



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS)

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR ANAERÓBICO PARA EL
TRATAMIENTO DE LAS AGUAMIELES DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ**

Ana Gloria Montes Peña

Ana Rufina Herrera Soto

Asesorado por el MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos

Guatemala, mayo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR ANAERÓBICO PARA EL
TRATAMIENTO DE LAS AGUAMIELES DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANA GLORIA MONTES PEÑA

ANA RUFINA HERREA SOTO

ASESORADO POR EL MSC. ING. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS DE INGENIERÍA
SANITARIA**

GUATEMALA, MAYO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much
EXAMINADOR	MSc. Ing. Felix Aguilar

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR ANAERÓBICO PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAMIELES DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos con fecha 23 de febrero de 2016.

Ana Rufina Herrera Soto

Correo electrónico: herrera_29@yahoo.com

Registro Univesitario: 1798691750101

Carné No.: 200915196

Ana Gloria Montes Peña

Correo electrónico: agmontes9@gmail.com

Registro Univesitario: 2298300130101

Carné No.: 200815347



Guatemala, 29 de mayo de 2017

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de asesor y coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR
ANAERÓBICO PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAMIELES DE UN
BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ**

Presentado por las estudiantes:

**Ing. Ana Rufina Herrera Soto
Ing. Ana Gloria Montes Peña**

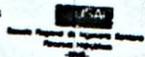
Les manifiesto que las estudiantes cumplieron en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M.Sc. Ing. Adán E. Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Mec. Ing. Adán Emerio Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC



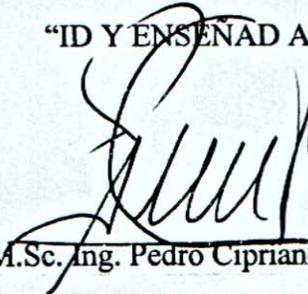


Guatemala, 30 de mayo de 2017

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos, M.Sc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, y M.Sc. Ing. Zenón Much Santos, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Jéssica Edith Melgarejo Monterroso, Colegiada No. 27003, al trabajo de las estudiantes Ing. Ana Rufina Herrera Soto e Ing. Ana Gloria Montes Peña, titulado: **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR ANAERÓBICO PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAMIELES DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ.** En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los 30 días del mes de mayo de 2017.

Imprimase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR



ACTO QUE DEDICO A:

Dios Todopoderoso

Por su infinita misericordia conmigo, guiando cada paso que doy en la vida; y por brindarme todos sus dones por medio de su Espíritu Santo; por ser fuente de amor, sabiduría y fortaleza.

Virgen María

Madre Santísima, por ser la intercesora ante Dios Padre, por cubrirme siempre con su divino manto, protegiéndome y dándome el consuelo en mis momentos difíciles.

Mis padres

Luis Antonio Montes González y Ana Leticia Peña Ayala, por ser mi mayor ejemplo de superación, por brindarme su amor incondicional y educarme con valores éticos y morales que me permitieron ser una persona de bien. Por su esfuerzo, dedicación y paciencia para conmigo.

Mis hermanos

Augusto Fernando Santiso Peña y Samanda Leticia Montes Peña, por darme su consejo e influir positivamente en mi vida; dándome su amor, protección y apoyo siempre. Jennifer Montes Peña (q.e.p.d), por ser mi ejemplo de lucha en la vida y mostrarme que aunque exista

impedimento, no hay excusas para ser felices y mostrar una sonrisa.

Mis abuelas

Blanca Gloria Ayala Solares (mamá Yoyita), por inculcarme el amor a las Tres Divinas Personas y a la Virgen María. Por darme su amor incondicional, por brindarme sus sabios consejos y estar al pendiente de mí en todas las etapas de mi vida. Adelaida González (mamá Dela, q.e.p.d), la llevo presente en mi corazón por ser una fuente de enseñanzas y alegría en mi vida.

Mi abuelo

Fernando Peña Gatica, por su apoyo y consejos de vida y sus consejos académicos.

Mi familia

A mis tíos, primos y sobrinos por estar siempre al pendiente de mí y apoyarme en el transcurso de mi vida, principalmente a Blanca Ligia Peña Ayala, que ha sido como una madre, y a mis primos Ligia Rossana López Peña, Carlos Aguilera Peña y Javier Aguilera Peña.

Ana Gloria Montes Peña

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi fuente de inspiración.
- Mi papá** Luis Felipe Herrera Arévalo (q.e.p.d.) porque tu amor y apoyo me inspiraron a ser la persona que soy hoy, mis triunfos son tus triunfos y cada meta que cumplo es en honor a tu memoria.
- Mi mamá** María Elizabeth Soto Tórtola. Todo este camino lo hemos recorrido juntas y nunca me has dejado caer, eres mi mayor apoyo.
- La familia Tecú Soto** Siempre ha estado mi lado ayudándome y dándome ánimos. Alejandro y José Luis, más que ser mis primos, son mis hermanos.
- Mis compañeros del área de fisicoquímica** Por toda su comprensión, apoyo y paciencia. En especial a los ingenieros William Fagiani y Mayra Quemé. Los admiro y les tengo mucho cariño.
- Mis amigos** Por siempre darme ánimos, consejos o café. Porque siempre han estado dispuestos a escucharme y apoyarme.

Ana Rufina Herrera Soto

AGRADECIMIENTOS A:

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos	Por ser nuestra casa de estudios y darnos el privilegio de formarnos bajo su techo. Por brindar las herramientas necesarias para ser profesionales de éxito.
Asociación Nacional del Cefé	Por abrirnos las puertas en el beneficio húmedo Nuevo Sendero, especialmente al Ing. Roberto Soto, al Ing. Manuel Solís, y a la Inga. Mariela Meléndez por su asesoría y colaboración.
Dirección General de Investigación USAC	Por brindarnos los recursos económicos necesarios para llevar a cabo esta investigación, así como su asesoría profesional en temas relacionados con la elaboración de investigaciones.
Personal del Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria	Por permitirnos realizar la investigación dentro de sus instalaciones y brindar apoyo técnico. Con especial cariño al Ing. Zenón Much y a Adolfo Dubón por compartir sus conocimientos, mostrando interés y colaboración constantes.
Dr. Stewart Oakley	Por ser un excelente profesional y coasesor, que motivó la realización de la presente investigación.

**Compañeros
estudios de ERIS**

de Gracias por recorrer juntos este camino, haciéndolo ameno y alegre; por su apoyo incondicional, por compartir sus experiencias profesionales y de vida. Por esa amistad centroamericana que cruza fronteras.

Ana Gloria Montes Peña

Ana Rufina Herrera Soto

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XX
ANTECEDENTES.....	XXI
ALCANCES Y LÍMITES	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXXI
1. MARCO TEÓRICO.....	33
1.1. Agua residual del proceso del café (aguamiel).....	33
1.2. Alternativas para el tratamiento de las aguas residuales del café.....	33
1.3. Proceso convencional de tratamiento de aguas residuales del café.....	35
1.4. Proceso anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales	36
1.5. Reactores anaeróbicos.....	39
1.5.1. Reactor anaeróbico de flujo ascendente (RAFA o UASB).....	40
1.5.2. Reactor anaeróbico con baffles (ABR)	43
2. METODOLOGÍA.....	45

2.1.1.	Método de investigación.....	46
2.1.2.	Instrumentos de investigación:	46
2.1.3.	Ruta metodológica	47
2.1.4.	Operacionalización de variables.....	51
2.1.5.	Metodología estadística	52
2.1.5.1.	Primera etapa: diseño de los reactores anaeróbicos.....	52
2.1.5.2.	Segunda etapa: operación de los reactores	52
2.1.6.	Tercera etapa: comparación de eficiencia entre tratamientos.....	55
2.1.7.	Diseño y construcción de los reactores anaeróbicos.....	56
2.1.7.1.	Descripción de las partes que conforman el sistema	56
2.1.8.	Descripción de los reactores	59
2.1.9.	Parámetros de diseño para cada reactor	64
2.1.10.	Calibración del caudal	65
2.1.11.	Memoria de cálculo del diseño	68
2.1.12.	Materiales utilizados para la construcción del sistema de tratamiento	80
2.1.13.	Procedimiento de la construcción.....	81
2.1.14.	Proceso de arranque y puesta en marcha del sistema.....	82
3.	RESULTADOS.....	85
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	93
	CONCLUSIONES.....	109

RECOMENDACIONES.....	111
BIBLIOGRAFÍA.....	113
APÉNDICES	117
ANEXOS.....	155

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tratamiento convencional de las aguas mieles.....	35
2.	Digestión anaerobia	36
3.	Esquema de reactor UASB	41
4.	Procesos que conforman la investigación	49
5.	Sistema de alimentación de aguamiel al reactor.....	57
6.	Sistema de tratamiento de aguamiel a escala laboratorio.....	58
7.	Dispositivo de separación y medición de metano	59
8.	Reactor ABR con baffles inferiores	61
9.	Acoples de entrada al reactor UASB.....	62
10.	Campana para recolección de biogás.....	62
11.	Reactor UASB.....	63
12.	Bomba peristáltica.....	67
13.	Esquema del diseño del reactor a nivel planta piloto	70
14.	Dimensiones ABR	71
15.	Perfiles de los vectores de velocidad en los deflectores	72
16.	Comparación entre dos formas de deflectores.....	74
17.	Esquema del reactor ABR.....	77
18.	Esquema del reactor UASB	79
19.	Cambio del potencial de hidrógeno del aguamiel tratada en el UASB ...	94
20.	Cambio del potencial de hidrógeno del aguamiel tratada en el ABR	96
21.	Cambio en la alcalinidad de las muestras tratadas con el UASB.....	98
22.	Cambio en la alcalinidad de las muestras tratadas con el ABR	99
23.	Cambio en la DQO de las muestras tratadas con el UASB.....	100

24.	Cambio en la DQO de las muestras tratadas con el ABR.....	101
25.	Cambio en la DBO ₅ de las muestras tratadas con el UASB	103
26.	Cambio en la DBO ₅ de las muestras tratadas con el ABR.....	103
27.	Comparación del cambio de potencial del hidrógeno con distintos tratamientos.....	106
28.	Cambio de la concentración de alcalinidad.....	108

TABLAS

I.	Definición del problema y soluciones.....	XVI
II.	Tipos de tratamiento aplicados a aguamiel.....	XXI
III.	Investigaciones realizadas sobre tratamiento de aguamiel.....	XXII
IV.	Investigaciones sobre industria del café y generación de metano... XXIV	
V.	Alternativas para el tratamiento de las aguas residuales del café	34
VI.	Ventajas y desventajas del proceso anaerobio.....	38
VII.	Etapas de la investigación	47
VIII.	Secuencia del procedimiento	47
IX.	Operacionalización de las variables.....	51
X.	Tamaño de la muestra	53
XI.	Análisis estadísticos por etapas de la investigación	56
XII.	Pruebas preliminares de caudal	65
XIII.	Calibración del caudal.....	67
XIV.	Proporción de las dimensiones del reactor	71
XV.	Proporción de espacios entre deflectores.....	74
XVI.	Dimensionamiento del reactor ABR	75
XVII.	Dimensionamiento del reactor UASB.....	78
XVIII.	Agua de inoculación.....	83
XIX.	Características de los reactores	85
XX.	Monitoreo del pH del aguamiel tratada en el UASB.....	86

XXI.	Monitoreo de la DQO del aguamiel tratada con el UASB.....	87
XXII.	Cambio de la alcalinidad de las muestras tratadas en el UASB.....	88
XXIII.	Comparación de la DBO ₅ de las muestras ingresadas al UASB	88
XXIV.	Monitoreo del potencial de hidrógeno de las muestras tratadas con el ABR.....	89
XXV.	Monitoreo de la DQO de las muestras tratadas con el ABR	90
XXVI.	Monitoreo del cambio de alcalinidad en las muestras tratadas con el ABR.....	90
XXVII.	Monitoreo del cambio de la DBO ₅ de las muestras que ingresaron al ABR.....	91
XXVIII.	Comparación del cambio de potencial de hidrógeno entre métodos....	91
XXIX.	Comparación del cambio de alcalinidad entre métodos	92

GLOSARIO

ABR	Reactor anaeróbico con baffles que en inglés se denomina Anaerobic Bafled Reactor.
Aguamiel	Aguas residuales generadas en el proceso de despulpado y lavado del café dentro del beneficiado húmedo.
Alcalinidad	Parámetro fisicoquímico que mide la capacidad amortiguadora de una solución acuosa. Generalmente, en los cuerpos de agua está conformada por carbonatos, hidróxidos y bicarbonatos (el mayor aportador). Las sales de ácidos débiles también contribuyen a la alcalinidad por poseer iones negativos.
Biomasa	Materia conformada por moléculas de seres vivos que se genera a través de un proceso biológico de descomposición microbiana y que puede emplearse para producir energía.
Calibración	Conjunto de operaciones que proveen una medida de comparación con el valor de los patrones establecidos para instrumentos y equipos, determinado así su desviación.

Caudal	Es el flujo de agua que pasa por un lugar con determinada área, durante un cierto periodo de tiempo.
Demanda bioquímica de oxígeno	Cantidad de oxígeno que usan los microorganismos, para degradar la materia orgánica contenida en una muestra líquida. Se le denomina DBO y es un parámetro indispensable para determinar la calidad o contaminación de los cuerpos hídricos.
Demanda química de oxígeno	Es un parámetro fisicoquímico de contaminación que mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente el material orgánico y las sustancias contenidas en una muestra líquida.
Despulpado	Proceso utilizado en un beneficio húmedo de café para la eliminación de la pulpa del grano y que tiene como medio de lubricación el mucílago del café.
Fermentación	Proceso en que se convierte una molécula compleja de un compuesto orgánico en una más sencilla, mediante una oxidación incompleta. Específicamente, en el beneficiado del café, se refiere al momento en que las enzimas naturales separan el mucílago del grano dentro de tanques en un lapso determinado.
Metano	Es un gas cuya fórmula química se representa como CH ₄ , este no posee color ni olor y tiene

características de inflamabilidad. Se produce por la descomposición microbiana de la materia orgánica.

Mucílago	Es una solución coloidal localizada entre la pulpa y la cáscara del grano de café. Contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos.
Potencial de hidrógeno	Es un parámetro que indica si determinada solución es ácida o alcalina. Se define como el logaritmo natural negativo de la concentración de iones hidronio en una solución. El rango de pH en las soluciones acuosas varían entre 0 y 14, en donde la soluciones con pH igual que 7 son neutras, mayor a 7 son alcalinas y menor a este mismo valor tienen propiedades ácidas.
Tiempo de retención celular	Es el tiempo que permanecen los lodos generados en un sistema de tratamiento dentro del mismo.
Tiempo de retención hidráulico	Tiempo de permanencia del agua residual en el sistema.
UASB	Reactor anaeróbico de flujo ascendente que en inglés se denomina Upflow Anaerobic Sludge Blanket

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de investigación fue diseñar, construir y evaluar el funcionamiento de dos tipos de reactores: uno tipo ABR y otro tipo UASB, para modificar el potencial de hidrógeno del aguamiel, elevándolo hasta una magnitud que pudiera ser considerada como neutral. Además, se comparó la eficacia de estos dos tipos de tratamientos con el tratamiento tradicional para este tipo de agua residual: agregar óxido de calcio al aguamiel; y también se comparó con una metodología que consiste en hacer pasar el aguamiel por un lecho de roca caliza.

Se construyó un reactor tipo UASB de 4.5 L de volumen, que operó con un tiempo de retención de 54.67 horas; y un reactor tipo ABR de 43 L de volumen, que funcionó con un tiempo de retención de 7.78 días.

Los resultados mostraron que tanto el UASB como el ABR modificaban la magnitud del potencial del hidrógeno del aguamiel, aumentándola. El tratamiento con el UASB tuvo una eficiencia promedio de 6%, en tanto que el ABR tuvo una eficiencia promedio de 23%, respecto al aumento del potencial de hidrógeno. Sin embargo, el cambio en este parámetro no fue lo suficientemente grande como para llevarlo a una magnitud 7 unidades, lo cual significaría que el aguamiel sería considerada neutra.

Además se evaluaron parámetros como la alcalinidad, la DQO y la DBO₅. En promedio, las muestras de aguamiel tratadas con el UASB disminuyeron su alcalinidad en 4471 mg/L de CaCO₃, es decir se obtuvo una disminución promedio de un 55%; en tanto que las muestras tratadas con el ABR tuvieron

una disminución promedio de 2266 mg/L de CaCO_3 , lo cual corresponde a un 54%.

Al evaluar la DQO de las muestras tratadas con los reactores biológicos, se observó que la magnitud de este parámetro también disminuía. En el caso de las muestras tratadas con el UASB se obtuvo una disminución promedio de 5443 mg/L, lo que corresponde a una eficiencia de 28%; y las muestras tratadas con el ABR disminuyeron el valor de su DQO en un promedio de 14116 mg/L, es decir que este tratamiento tuvo una eficiencia de 61%.

También se evaluó la magnitud de la DBO_5 de las muestras de aguamiel antes y después de pasar por los tratamientos anaeróbicos, pero al evaluar estadísticamente el cambio de magnitud de este parámetro se determinó, con un nivel de confianza del 95%, que ninguno de los dos reactores fue capaz de modificar la magnitud de este parámetro.

Dado el hecho de que ambos reactores trabajaban de forma anaeróbica, se esperaba observar la formación de gas metano, como subproducto de la degradación de la materia orgánica. Si bien si se pudo observar la aparición de burbujas de gas formadas en la parte superior de los reactores, no pudo cuantificarse la cantidad de gas generado.

Al comparar los cuatro tipos de tratamiento antes mencionados, se determinó, por medio de la prueba estadística de Tukey, que el tratamiento que provocaba un mayor aumento en la magnitud del potencial de hidrógeno del agua era el tratamiento con óxido de calcio. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que no se hicieron pruebas de estabilidad para evaluar si la magnitud del potencial de hidrógeno permanecía constante luego de pasar por el tratamiento.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción del problema

La principal característica de las aguamieles es su alta carga orgánica y un potencial de hidrógeno bajo, para mitigar el problema del pH usualmente se agrega óxido de calcio (cal), lo cual implica aumentar los costos de operación a la vez que no resuelve eficientemente el problema de tratamiento del aguamiel.

La investigación realizada por Jingxia Yang y Stewart Oakley (2014), demuestra que es posible utilizar un reactor anaeróbico de flujo ascendente para aumentar el pH del agua residual del proceso del café, sin embargo, dicho dispositivo requiere de agitación mecánica y de una elevación de la temperatura del aguamiel previa a su tratamiento en el reactor.

La investigación que se llevará a cabo pretende determinar el siguiente cuestionamiento: ¿Es posible aumentar el pH del aguamiel utilizando un reactor anaeróbico, que trabaje a temperatura ambiente y que no requiera de agitación mecánica?

Definición del problema

La siguiente tabla ofrece un resumen del problema principal y de los secundarios que se investigarán, así como de las soluciones que se ofrecen para ellos:

Tabla I. **Definición del problema y soluciones**

Problema	Solución propuesta	Pregunta de investigación	
El agua residual del café posee un bajo pH y actualmente se utilizan químicos para elevarlo.	Diseño y construcción de un reactor anaeróbico.	¿El reactor será capaz de aumentar el pH de las aguamieles del café?	Pregunta principal.
El agua residual del café posee una alta carga orgánica.	Diseño y construcción de un reactor anaeróbico.	¿El reactor será capaz de disminuir la carga orgánica de las aguamieles del café?	Preguntas secundarias.
Elevar la temperatura del aguamiel para ser utilizada en reactores anaeróbicos implica gastos.	Hacer funcionar el reactor a temperatura ambiente para evaluar la efectividad del tratamiento en tales condiciones.	¿El tratamiento será efectivo sin importar que se trabaje a temperatura ambiente?	
Utilizar agitación mecánica en los reactores implica gastos.	Reemplazar el agitador por un lecho de materia orgánica a través del cual fluya el aguamiel.	¿Utilizar un lecho de materia orgánica en el reactor, a través del cual fluya el aguamiel, reemplazará el efecto que produce la agitación mecánica?	
Diferentes eficiencias en los métodos investigados en ERIS.	Comparar la eficiencia de los tres métodos para aumentar el pH	¿Cuál de los métodos de tratamiento es más eficiente?	

Fuente: elaboración propia.

JUSTIFICACIÓN

El agua residual generada en un beneficio húmedo de café arrastra el mucílago fermentado del grano del café en el proceso de despulpado y lavado, esta agua residual se caracteriza por tener una alta carga orgánica y un potencial de hidrógeno bajo. Por lo tanto, el aguamiel requiere de un tratamiento previo a ser descargada a un río o reutilizada en el riego de las plantaciones.

El uso del aguamiel para riego implica prestar mayor atención al tratamiento que se le da al agua para estabilizar su potencial de hidrógeno y no dañar a las plantaciones. El tratamiento tradicional se lleva a cabo mediante el tamizado, neutralización con cal, floculación, sedimentación, filtración y separación de agua clarificada y de los lodos. Si bien la adición de cal al aguamiel aumenta la magnitud de su potencial de hidrógeno, este parámetro no permanece estable y fluctúa a lo largo del tiempo.

Anteriormente se han realizado investigaciones en las que se elevan el pH del aguamiel agregando compuestos químicos como la cal, hidróxido de sodio o haciéndola pasar por un lecho de piedra caliza. A pesar que estos métodos elevan el pH, no aseguran que el potencial de hidrógeno permanezca constante.

Este inconveniente hace necesario que se evalúen nuevas formas de tratamiento que permitan estabilizar el potencial de hidrógeno del aguamiel, sin adicionar productos químicos, tomando en cuenta que estos nuevos tratamientos deberían de ser diseñados de manera tal, que sean de fácil implementación y operación y que no requieran de la utilización de energía

eléctrica. Por ello, en esta investigación se plantea la evaluación de la utilización de dos reactores anaeróbicos, con la finalidad de determinar si es posible aumentar el potencial de hidrógeno del aguamiel mediante un proceso exclusivamente biológico.

Esta investigación tuvo como punto de partida los resultados publicados por Jingxia Yang y Stewart Oakley, quienes construyeron un reactor anaeróbico capaz de aumentar el potencial de hidrógeno del aguamiel, basándose en que un proceso biológico puede destruir las cadenas de proteínas contenidas en el aguamiel, produciendo alcalinidad que podría neutralizar el potencial de hidrógeno del agua residual del café. Esto permitiría eliminar la necesidad de adicionar compuestos químicos al agua residual del beneficio húmedo de café, y generar gas metano, como subproducto del proceso, mismo que podría ser utilizado para generar energía eléctrica.

El reactor anaeróbico utilizado en este trabajo no utilizó agitación mecánica, como en la investigación realizada por Jingxia Yang y Stewart Oakley, por lo que al llevarlo a escala planta piloto implicaría evitar los costos de energía eléctrica que requiere para su operación. De igual manera, se evaluó la eficiencia del tratamiento a temperatura ambiente.

OBJETIVOS

General

Evaluar la eficiencia de un reactor anaeróbico para aumentar la magnitud del potencial de hidrógeno del agua residual proveniente de un beneficio húmedo de café, sin utilizar agitación mecánica o reactivos químicos.

Específicos

1. Diseñar y construir un reactor anaeróbico, que no necesite de agitación mecánica o reactivos químicos, para tratar el agua residual que proviene de un beneficio húmedo de café.
2. Evaluar la eficiencia del reactor diseñado para aumentar el potencial de hidrógeno del aguamiel y reducir su carga orgánica.
3. Evaluar el funcionamiento del reactor determinando la magnitud de la alcalinidad, la demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno y la producción de gas metano en el afluente y efluente del reactor.
4. Comparar la eficiencia en el aumento del potencial de hidrógeno del reactor diseñado, mediante los métodos utilizados tradicionalmente.

Hipótesis

Un reactor anaeróbico, que trabaje a temperatura ambiente y sin agitación mecánica, es capaz de aumentar el potencial de hidrógeno del aguamiel generada en un beneficio húmedo de café, hasta alcanzar una magnitud que pueda ser considerada como neutra.

ANTECEDENTES

El tratamiento del agua residual de los beneficios húmedos del café se ha realizado, tradicionalmente, mediante la adición de óxido de calcio (cal). Este tipo de tratamiento presenta un problema: si bien el potencial de hidrógeno del agua aumenta, la magnitud de este parámetro no permanece estable durante mucho tiempo.

Sin embargo, se han realizado otras investigaciones, con el objetivo de crear un tratamiento que permita aumentar la magnitud del potencial de hidrógeno del agua, manteniéndolo estable durante un período de tiempo más amplio.

Los tratamientos implementados hasta el momento se podrían clasificar como:

Tabla II. **Tipos de tratamiento aplicados a aguamieles**

Código	Nombre del tratamiento	Tipo de tratamiento	Problema
1	Tradicional: adicionamiento de cal/ soda cáustica.	Químico	Inestabilidad del potencial de hidrógeno. No aporta un tratamiento biológico.

Continuación tabla II.

2	Adicionamiento de bicarbonato de calcio y cal.	Químico	Inestabilidad del potencial de hidrógeno. No aporta un tratamiento biológico.
3	Lecho de roca caliza.	Químico	Inestabilidad del potencial de hidrógeno. No aporta un tratamiento biológico.
4	Reactor anaerobio con agitación mecánica.	Químico-Biológico	Necesita de energía eléctrica para realizar la agitación.

Fuente: elaboración propia.

La siguiente tabla clasifica las investigaciones que se han realizado, hasta el momento, para llevar a cabo el tratamiento del potencial de hidrógeno del agua residual de los beneficios húmedos de café:

Tabla III. **Investigaciones realizadas sobre tratamiento de aguamiel**

Título de la investigación	Investigador	Entidad	Código del tratamiento	Fecha de publicación
Neutralización del potencial de hidrógeno del aguamiel de un beneficio húmedo tecnificado de café.	Inga. Claudia Cerrato Espinal.	ERIS, USAC.	2	Agosto, 2013.
Evaluación de la eficiencia de modelos experimentales de lecho de roca caliza y laguna facultativa, a escala de laboratorio, para el ajuste del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado de café.	Inga. Bianca Ileana Alas Fajardo Ing. Marco Antonio Moreno Alvarado	ERIS, USAC.	3	Julio, 2013.

Continuación tabla III.

<p>“COG” Proceso anaeróbico para el tratamiento y valorización del agua residual del proceso del café.</p>	<p>Jingxia Yang. Stewart Oakley</p>	<p>California State University, Chico, California, USA Brightao Technology LTD, Beijing, China.</p>	<p>4</p>	<p>Agosto, 2014.</p>
<p>Experiencia finca El cascajal: Planta de tratamiento de aguas residuales y generación de energía limpia fue desarrollada en la región VII cafetalera.</p>	<p>Ing. Manuel Quiñónez Ing. Leonardo Sánchez</p>	<p>ANACAFE, Guatemala.</p>	<p>1, 4</p>	<p>Abril, 2014.</p>
<p>Evaluación del uso de dos tipos de cal HORCALSA para el tratamiento de aguas residuales del café.</p>	<p>Ing. Roberto Soto. Inga. Doris Vega</p>	<p>ANACAFÉ.</p>	<p>1</p>	

Fuente: elaboración propia.

Además de las investigaciones realizadas para modificar el potencial de hidrógeno del aguamiel, como antecedentes, se deben de tomar en cuenta las investigaciones realizadas para estudiar el proceso industrial del café y la generación de gas metano, entre otros. A continuación se clasifican tales investigaciones:

Tabla IV. Investigaciones sobre industria del café y generación de metano

Título	Investigador	Institución	Fecha de publicación	Eje temático
Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost.	Daniel Blanco Cobán.	Instituto de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Biodiversidad, Universidad de León.		Generación de biogás.
Aplicación de la ingeniería química a la agroindustria del café.	Ing. Efrén Menchú.	Facultad de Ingeniería, USAC.	1993.	Proceso del café.
Evaluación de la eficacia de tratamiento de aguas mieles de un beneficio húmedo de café, localizado en San Juan la Laguna, Sololá.	William Antonio Xil Barrios.	EIQ, USAC.	Octubre, 2012.	Tratamiento de aguamiel.
Diseño de la investigación para la evaluación de aguamiel para riego en plantillas de café en el beneficio húmedo cooperativa Nuevo Sendero en la aldea Chapas, Nueva Santa Rosa, Guatemala, C.A.	Laura Varela.	EIQ, USAC.	Marzo, 2013.	Tratamiento de aguamiel.

Continuación tabla IV.

Evaluación fisicoquímica de subproductos del beneficio húmedo de café, sometidos a tratamiento anaeróbico, San Juan La Laguna, Sololá, Tesis de grado.	Edgar Enrique García Monroy.	Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, URL.	Septiembre, 2014.	Tratamiento anaerobio.
--	------------------------------	--	-------------------	------------------------

Fuente: elaboración propia.

ALCANCES Y LÍMITES

El alcance del presente estudio comprende el diseño, construcción y evaluación de dos reactores anaeróbicos, a escala laboratorio, que permitan aumentar el potencial de hidrógeno de las aguas mieles, sin la utilización de agitación mecánica ni la adición de productos químicos. Así mismo, pretende evaluar la disminución de la demanda química de oxígeno y la demanda bioquímica de oxígeno por medio de un tratamiento biológico que pueda destruir las cadenas de proteínas contenidas en el aguamiel y producir alcalinidad que podría neutralizar el potencial de hidrógeno del aguamiel.

La investigación incluye la comparación con otros dos métodos de tratamiento investigados en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, por lo que se replicó la metodología y unidades construidas para evaluar la eficacia en aumento del potencial de hidrógeno.

- **Delimitación temporal y geográfica**

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio Dra. Alba Tabarini, que se encuentra en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se construyeron y colocaron dos reactores anaeróbicos, uno llamado UASB y el otro ABR. Así mismo dentro del laboratorio se replicó y se evaluó la unidad de tratamiento de roca caliza y el método de utilización de óxido de calcio (cal).

Las muestras de aguamiel con las que se realizó el estudio fueron provistas por ANACAFÉ, y provenían del beneficio húmedo “Nuevo Sendero”,

ubicado en la aldea de Chapas, municipio de Nueva Santa Rosa, departamento de San Rosa.

La investigación fue realizada desde diciembre de 2015 hasta noviembre de 2016. El reactor UASB fue construido en diciembre del año 2015 y el reactor ABR en febrero del año 2016.

- **Delimitación del campo de estudio**

- Agua residual del proceso de café “aguamiel”.
- Tratamiento de agua: aumento del pH, reducción de materia orgánica, generación de metano y alcalinidad.
- Unidad de diseño: reactor anaerobio sin necesidad de agitación mecánica (UASB y ABR).
- Unidad de comparación: tratamiento con óxido de calcio y tratamiento lecho de roca caliza.

- **Limitaciones del estudio**

La principal limitación fue la disponibilidad del aguamiel, ya que esta se restringe al período de la cosecha del café, que es de aproximadamente de cinco meses. En el 2015 existió un atraso en la cosecha del café por lo que estuvo a la disposición desde diciembre, cuando en una temporada normal empieza en octubre. Las muestras de aguamiel fueron recolectadas de diciembre 2015 hasta abril de 2016, teniendo que almacenarlas de manera refrigerada

Debido a que se realizó un proceso biológico dentro de los reactores, se tuvo que contemplar el período de arranque y acondicionamiento de las

bacterias al aguamiel. Estas bacterias provenían de los lodos de un reactor anaeróbico de flujo ascendente que trataba aguas domésticas cuya carga orgánica es mucho menor al del aguamiel, por tal motivo se adicionaba gradualmente el aguamiel para que dichas bacterias pudieran adaptarse a las nuevas condiciones. Esto acortó el tiempo para realizar las pruebas fisicoquímicas durante el período de cosecha, provocando el almacenamiento de una mayor cantidad de aguamiel.

INTRODUCCIÓN

A partir del proceso de producción de café se obtiene un tipo de agua residual denominada como “aguamiel”. Este tipo de agua residual se caracteriza por tener un potencial de hidrógeno ácido (entre 3 y 4 unidades) y una carga orgánica alta. Tradicionalmente, el aguamiel se trata agregándole óxido de calcio (cal) lo cual aumenta la magnitud de su potencial de hidrógeno.

Además del tratamiento con óxido de calcio, se han llevado a cabo investigaciones que pretenden determinar si este tipo de agua residual puede ser tratada utilizando filtros de piedra caliza o utilizando reactores anaeróbicos.

Este trabajo de investigación presenta los resultados de tratar el aguamiel utilizando dos tipos de reactores anaeróbicos: uno tipo UASB y otro tipo ABR. Evaluando los resultados del tratamiento mediante la determinación del potencial de hidrógeno, alcalinidad, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y producción de gas metano.

Los problemas potenciales pueden surgir durante el arranque del reactor como resultado de la acumulación de ácidos grasos volátiles y el ácido sulfhídrico disuelto, que ocurre cuando los metanógenos y ciertos acetógenos están en gran medida superados en número por los acidógenos que crecen rápidamente. El pH bajo y la exposición de las bacterias sensibles en los compartimientos delanteros del ABR a niveles tóxicos de compuestos inorgánicos y orgánicos en la alimentación pueden considerarse como los problemas de puesta en marcha.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Agua residual del proceso del café (aguamiel)

Se denomina aguamiel al agua residual del proceso del lavado y despulpado del café dentro de un beneficio húmedo, en estos procesos se aporta al agua una alta cantidad de materia orgánica, azúcares, sólidos sedimentables, fósforo, nitrógeno, carbohidratos no fermentables, alcoholes, ácidos orgánicos, cafeína, taninos, ácido cafeico y ácido clorogénico. Estas características la hacen altamente contaminante para el medio ambiente y principalmente para el recurso hídrico, ya que por su alta demanda bioquímica de oxígeno consume el oxígeno disuelto que se encuentra en el agua y que es fundamental para la supervivencia de la flora y fauna acuática.

1.2. Alternativas para el tratamiento de las aguas residuales del café

Las aguas mieles pueden tratarse de manera biológica o química. Por el método biológico se pueden utilizar lagunas facultativas o anaeróbicas y reactores anaeróbicos. En estas unidades de tratamiento existen bacterias metanogénicas que degradan la materia orgánica contenida en las aguamiel y al mismo tiempo generan metano que puede utilizarse como una fuente aprovechable de energía. El proceso convencional que recomienda Anacafé es de tipo químico ya que requiere reactivos para tratar el agua, principalmente para elevar el pH. A continuación se presentan las alternativas que se han implementado para el tratamiento de las aguas mieles.

Tabla V. **Alternativas para el tratamiento de las aguas residuales del café**

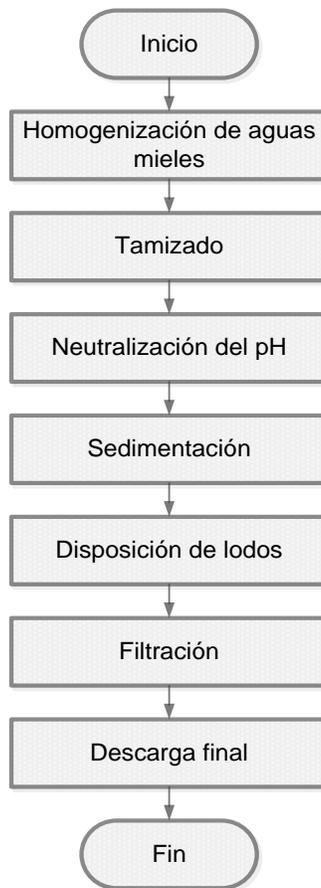
Alternativa	Mecanismo de funcionamiento	Eficiencia observada	Observaciones
Riego de cultivos.	Infiltración en terrenos de cultivo. Aprovechamiento de la materia orgánica en el agua.	Afecta los cultivos por quema.	Riego de cultivos.
Disposición en el terreno.	Evaporación e infiltración de las aguas.	En dependencia de factores climáticos y del terreno.	Barato, pero existe el riesgo de contaminar el manto freático.
Tamizado.	Eliminación de los sólidos en suspensión.	Bastante eficiente; eliminación sólidos de mayor tamaño.	Tamizado.
Tratamiento químico.	Eliminación de sólidos en suspensión, a través de coagulación/floculación y sedimentación.	Bastante eficiente, elimina los sólidos y malos olores presentes en el agua.	
Lagunaje facultativa o anaerobia.	Eliminación de material disuelto en suspensión, a través de actividad biológica (algas y bacterias).	Poca materia orgánica removida por procesos biológicos.	Las lagunas fácilmente se acidifican y crean un ambiente ácido no apto para las bacterias descontaminantes.
Reactores anaerobios.	Eliminación de material disuelto o en suspensión a través de actividad biológica (bacterias anaerobias).	Buena remoción de materia orgánica. Producción de gas metano que puede ser aprovechado.	Manejo complejo y caro, en cuanto a inversión y operación.

Fuente: GARCÍA, Edgar. *Evaluación fisicoquímica de sub productos del beneficiado húmedo de café, cometidos a tratamiento anaeróbico; San Juan La Laguna, Sololá.* p.11.

1.3. Proceso convencional de tratamiento de aguas residuales del café

El tratamiento convencional de aguamieles en los beneficios húmedos tecnificados, presenta una serie de procesos unitarios que le permiten elevar el pH y bajar la carga orgánica que son los principales problemas que presentan dichas aguas y que son de difícil cumplimiento de la normativa nacional en tema de aguas residuales, en este caso el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Según Anacafé, el tratamiento convencional consta de las siguientes etapas.

Figura 1. Tratamiento convencional de las aguamieles



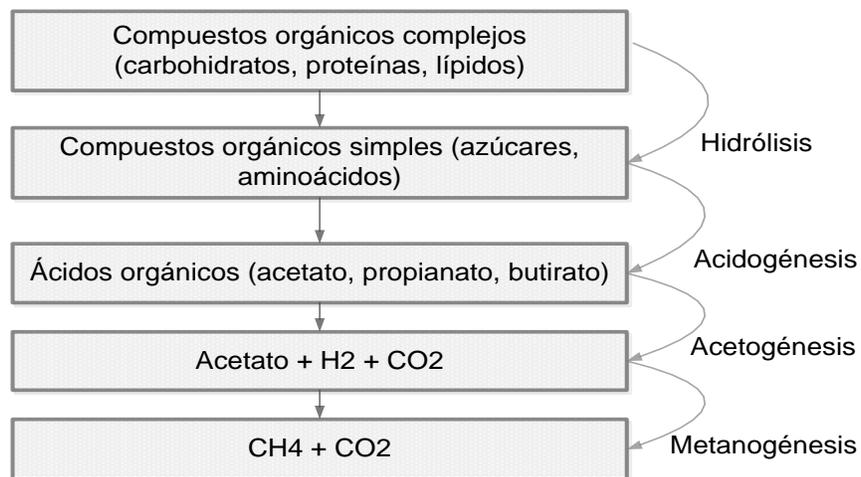
Fuente: elaboración propia.

1.4. Proceso anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales

Es un tipo de tratamiento biológico en donde la actividad biológica de los microorganismos remueve sustancias orgánicas biodegradables del agua residual, utilizándolas como fuente de alimento y generando gases y biomasa extraíble mediante sedimentación. El proceso anaeróbico no requiere oxígeno externo para funcionar, debido a que utiliza el oxígeno que contienen las moléculas de los compuestos orgánicos que degrada.

“El proceso anaerobio es menos eficiente en la producción de energía que el aerobio, puesto que la mayoría de energía liberada en el catabolismo anaerobio proveniente de la sustancia descompuesta aún permanece en los productos finales orgánicos reducidos como el metano, generándose una cantidad de biomasa mucho menor que la producida en el proceso aerobio”.¹

Figura 2. Digestión anaerobia



Fuente: ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales*. p.237.

¹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales*. p.233.

El proceso de anaerobio se puede resumir básicamente en dos etapas para la descomposición de la materia orgánica, que ocurren simultáneamente. Estas son la fermentación ácida y la fermentación de metano.

En la fermentación de los ácidos, los compuestos orgánicos de estructura compleja como las proteínas, grasas y carbohidratos se hidrolizan primero en unidades moleculares más pequeñas y son sometidos a bio-oxidación para convertirlos en ácidos orgánicos de cadena corta, principalmente en compuestos como ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico, hidrógeno y dióxido de carbono.

Por otro lado, la fermentación metanogénica se presenta solamente en condiciones anaeróbicas donde los microorganismos metanogénicos convierten los productos de la fermentación de los ácidos en gases como el metano y el dióxido de carbono principalmente. Los ácidos en que se utiliza la bacteria del metano como fuente de energía son el ácido acético, ácido fórmico, metanol e hidrógeno, los cuales se degradan en los compuestos gaseosos antes mencionados y genera alcalinidad de bicarbonatos.

Las bacterias metanogénicas son de crecimiento muy lento, por lo que el tiempo de retención celular debe ser lo suficientemente largo para permitir su crecimiento y evitar su extracción del sistema. Estas bacterias se asemejan a las que se encuentran en los estómagos de animales rumiantes y en sedimentos de ríos y lagos. Según Jairo Romero se mencionan las siguientes condiciones: tiempos de retención de 2 a 20 días ya que la tasa de crecimiento es lenta y se deben de proveer tiempos de retención prolongados; el pH debería estar entre 6.8 a 7.4 y se considera que la fermentación metanogénica controla la tasa del proceso.

En la actualidad el tratamiento anaeróbico con fermentación del metano es factible con aguas residuales diluidas frías, aunque es una de las aplicaciones microbiales más difíciles. De acuerdo con Jewell, el tratamiento eficiente de residuos diluidos de 200 a 600 mg/L de DQO requiere edades de lodos mínimas de 120 días a 30 °C y de 320 días a 10 °C. Las aguas residuales con concentraciones altas de DBO, mayor que 2 000 mg/L y con contenido alto de amonio, son muy apropiadas para el tratamiento anaerobio. Las aguas residuales de un beneficio húmedo tecnificado están alrededor de una DBO de 30 000 mg/L, por lo que es factible su tratamiento por un proceso anaeróbico

Tabla VI. **Ventajas y desventajas del proceso anaerobio**

Ventajas	Desventajas
Utiliza poca energía por no requerir oxígeno.	Requiere de temperaturas altas para obtener alto grado de tratamiento.
Es especialmente útil para aguas residuales con alto contenido orgánico.	Puede generar ácido sulfhídrico que tiene riesgos a la salud y el medio es corrosivo.
Poca producción de lodos debido a que tienen una baja síntesis celular.	Puede presentar malos olores por contener ácido sulfhídrico, ácidos grasos y amidas.
El lodo producido es razonablemente estable y se puede secar y disponer por métodos convencionales.	Es sensible a la contaminación por oxígeno.
Tiene requerimientos nutricionales bajos.	El intervalo de operaciones de pH es restringido.
Produce metano que tiene un valor calorífico aproximado de 36.5 kJ/m ³ que indica que es útil energéticamente. El biogás que se produce en los digestores contiene un 65% de metano.	Requiere altas concentraciones de alcalinidad.

Fuente: ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales*. p.246.

1.5. Reactores anaeróbicos

En un reactor anaeróbico, las bacterias metanogénicas y no metanogénicas tienen que estar en equilibrio dinámico. El reactor debe carecer de oxígeno disuelto para favorecer las condiciones anaeróbicas; estar libre de metales pesados que son sustancias inhibitoras del proceso y mantener un pH mayor a 6.2, debido que bajo ese nivel las bacterias metanogénicas ya no trabajan por lo que se hace necesario agregar un agente neutralizante, especialmente en la etapa inicial de funcionamiento del reactor; la temperatura influye en la actividad y crecimiento bacteriano; por último se tiene a los nutrientes, ya que las bacterias básicamente necesitan nitrógeno y fósforo para su desarrollo.

En un digestor de lodos, operando apropiadamente, la alcalinidad oscila entre 1000 y 5000 mg/L y los ácidos volátiles se encuentran en concentraciones mejores de 250 mg/L. La estabilización o remoción bioquímica de DBO ocurre en la etapa de formación de metano, porque este es poco soluble en el agua y se evapora con el gas que sale del reactor.

“El efecto de la temperatura en el proceso anaeróbico influye de manera decisiva en el proceso, debido a que de éste dependen las velocidades de reacción con que se lleva a cabo cualquier proceso biológico, además de la posible influencia o daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio. La temperatura influye decisivamente en la cinética de los procesos anaerobios y en particular, en la tasa de difusión de sustrato y en la tasa de las reacciones enzimáticas.”²

² AGRAMONTE OCHOA, Osmara. *Tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando tecnología anaerobia UASB en clima templado – frío*. p.40.

El factor exterior más importante es la temperatura, esta debe mantenerse en un rango óptimo entre 15 y 70 °C. Existen tres rangos de trabajo de la temperatura por los tipos de degradaciones bacterianas existentes, está la zona psicrófila, la zona mesofílica y la zona termofílica. A medida que la temperatura aumenta, también el crecimiento de bacterias, y por lo tanto, la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás.

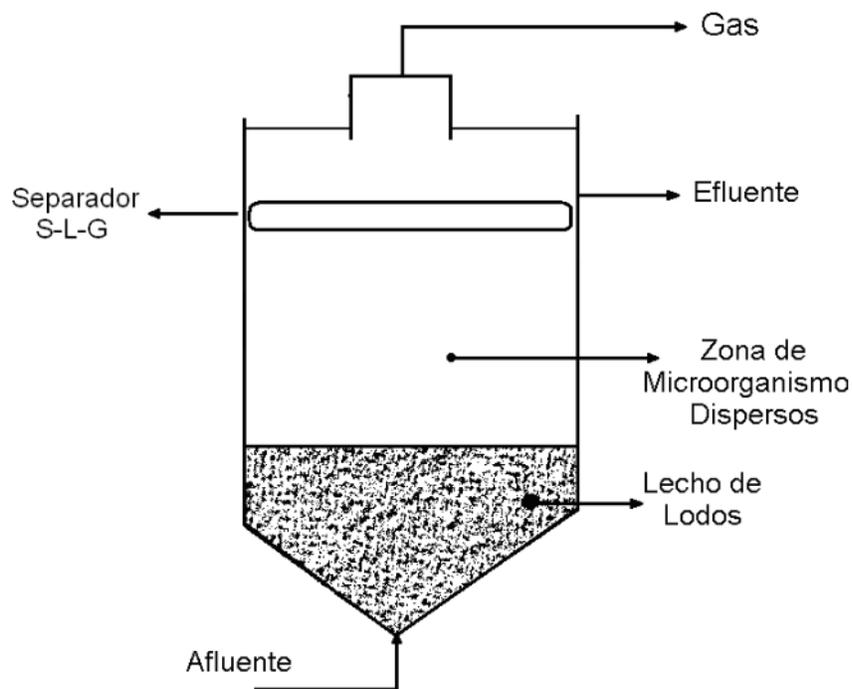
1.5.1. Reactor anaeróbico de flujo ascendente (RAFA o UASB)

Es un tipo de reactor anaeróbico que se caracteriza por no poseer material inerte como soporte para la biomasa, por lo que la inmovilización de los microorganismos ocurre por una autoformación de flóculos o gránulos densos suspendidos, lo que lo hace más económico; su flujo es ascendente y pasa a través del lecho de lodo denso, que se disponen en capas de lodo a partir del fondo del reactor; la estabilización de la materia orgánica ocurre en todas las zonas del reactor. En un UASB, se distinguen principalmente tres zonas:

- Zona de lecho de lodos: En esta se concentran los microorganismos que se encargan de biodegradar el material orgánico presente en el agua residual que se tratará. En esta área se desarrolla una capa de lodo concentrado entre 4 y 10% con buenas características de sedimentación.
- Zona de microorganismos dispersos: sobre la capa de lodo sedimentado se desarrolla una zona de crecimiento bacteriano más disperso llamado manto de lodos, en el que los sólidos presentan velocidades de sedimentación más bajas y la concentración de los lodos disminuye entre 1.4 y 3%.

- Zona de separación de gas-líquido-sólido: En la parte superior del UASB se encuentra un separador de gases-sólido-líquido cuyo objetivo es retener los lodos dentro del reactor. Sobre el separador se ubica el sedimentador donde el lodo se sedimenta y vuelve al compartimiento de digestión.

Figura 3. **Esquema de reactor UASB**



Fuente: AGRAMONTE OCHOA, Osmara. *Tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando tecnología anaerobia UASB en clima templado – frío*. p.48.

Para una buena operación de un reactor UASB existen algunas consideraciones que son de gran importancia, estos son:

- El sistema de un UASB no requiere necesariamente de agitación mecánica ya que el movimiento ascendente de las burbujas de biogás

generado en el proceso de anaerobiosis y el flujo de líquido a través del reactor provocan turbulencia y un mezclado adecuado.

- Los tiempos de retención celular por lo general son mayores a 30 días, no obstante, dependerá del proceso de formación de gránulos que logren aglomerarse para aumentar el grado de sedimentación, que será la principal limitante en la operación de un reactor UASB. Derivado de su alto tiempo de retención, el lodo generado al momento de ser descartado se encontrará estabilizado. Así mismo, deben desarrollarse una cantidad apropiada de microorganismos dentro del reactor.
- Se debe contar con la mayor cantidad posible de biomasa dentro del UASB y para evitar que salga del sistema, debe favorecerse las velocidades bajas del flujo de agua que se tratará dentro de los compartimientos de digestión y sedimentación. Por lo tanto es indispensable que el régimen del flujo sea uniforme y laminar en el sedimentador y que no se produzca biogás dentro del mismo.
- La capacidad de degradación de la materia orgánica contenida en el agua residual depende de la concentración de lodos en la zona de dispersión, ya que esto genera una mayor producción de biogás. Sin embargo, a muy altas concentraciones de lodos en esta zona, el sistema de recirculación puede bloquearse y sobrecargar al sedimentador. Por lo tanto las propiedades de sedimentación del lodo son primordiales para el buen funcionamiento de un reactor UASB.

1.5.2. Reactor anaeróbico con baffles (ABR)

El ABR es un tipo de reactor anaeróbico de alto rendimiento, este utiliza una serie de deflectores verticales para forzar el flujo de aguas residuales por debajo y por encima de ellos a medida que pasa desde la entrada a la salida. Las aguas residuales pueden entrar en contacto íntimo con una gran cantidad de biomasa activa, mientras que el efluente permanece relativamente libre de sólidos biológicos. Además, el ABR se caracteriza por separar la acidogénesis y la metanogénesis longitudinalmente por el reactor; así como por mejorar la estabilidad del reactor.

Es esencial una rápida puesta en marcha del reactor ABR para lograr alcanzar una alta eficiencia, debido a las tasas de crecimiento lento de microorganismos anaeróbicos, especialmente las bacterias productoras de metano. Durante la puesta en marcha del reactor anaeróbico, la biomasa se aclimata a nuevas condiciones ambientales, tales como sustrato, estrategias operativas, temperatura y configuración del reactor.

2. METODOLOGÍA

La finalidad de este estudio fue diseñar y construir un reactor anaerobio capaz de aumentar la magnitud del potencial de hidrógeno del aguamiel, proveniente de un beneficio húmedo, sin la necesidad de utilizar reactivos químicos.

En la actualidad, se trabaja con reactores anaeróbicos capaces de llevar a cabo el aumento del potencial de hidrógeno del agua residual del proceso del café, pero que necesitan de agitación mecánica para poder poner en contacto la totalidad del agua residual tratada con la materia orgánica cuya degradación provoca el aumento de alcalinidad en el agua. Este trabajo de investigación se enfocó en diseñar un reactor anaeróbico que funcionara, de manera tal, que fuera posible eliminar la necesidad de llevar a cabo una agitación mecánica.

Para llevar a cabo la evaluación de los sistemas anaeróbicos el experimento se llevó a cabo con dos tipos de reactores: uno de tipo UASB y otro de tipo ABR.

Dado el hecho de que los reactores deberían de ser capaces de modificar el potencial de hidrógeno del aguamiel, se escogió este parámetro como variable de diseño. Sin embargo, se midieron cuatro parámetros más para evaluar el funcionamiento de los reactores:

- Alcalinidad (entrada y salida de los reactores)
- Demanda bioquímica de oxígeno (entrada y salida de los reactores)
- Demanda química de oxígeno (entrada y salida de los reactores)

- Generación de metano (subproducto del proceso)

Sin embargo, experimentalmente, no fue posible medir la generación de metano.

Además del diseño y construcción de los dos reactores anaeróbicos, se comparó la eficiencia de estos con la de otras unidades de tratamiento destinadas a aumentar el potencial de hidrógeno del agua residual del proceso del café; específicamente se evaluó la eficiencia de la utilización de óxido de calcio (cal) y la implementación de un lecho de roca caliza.

2.1 Descripción del método de investigación, técnicas e instrumentos

2.1.1. Método de investigación

Se realizó una investigación de tipo cuantitativa, en la cual se diseñó el equipo necesario para tratar de manera anaerobia el aguamiel de un beneficio húmedo de café, comparando la eficiencia de este tratamiento con los resultados de tratar este tipo de agua residual con cal o con piedra caliza.

2.1.2. Instrumentos de investigación:

La siguiente tabla presenta la clasificación de los instrumentos que se utilizaron en la investigación en función de las etapas en las que se dividió:

Tabla VII. **Etapas de la investigación**

ETAPA	CLASIFICACIÓN	INSTRUMENTO
Etapa 1	Construcción del reactor	Memoria de cálculo
Etapas 2 y 3	Determinación del pH	Potenciómetro
	Determinación de la alcalinidad	Equipo de titulación
	Determinación de la DQO	Reactor, espectrofotómetro
	Determinación de la DBO ₅	Sonda de oxígeno
	Tabulación de datos	Tabla de recolección de datos
	Análisis y procesamiento de datos	Microsoft Excel

Fuente: elaboración propia.

2.1.3. Ruta metodológica

Tabla VIII. **Secuencia del procedimiento**

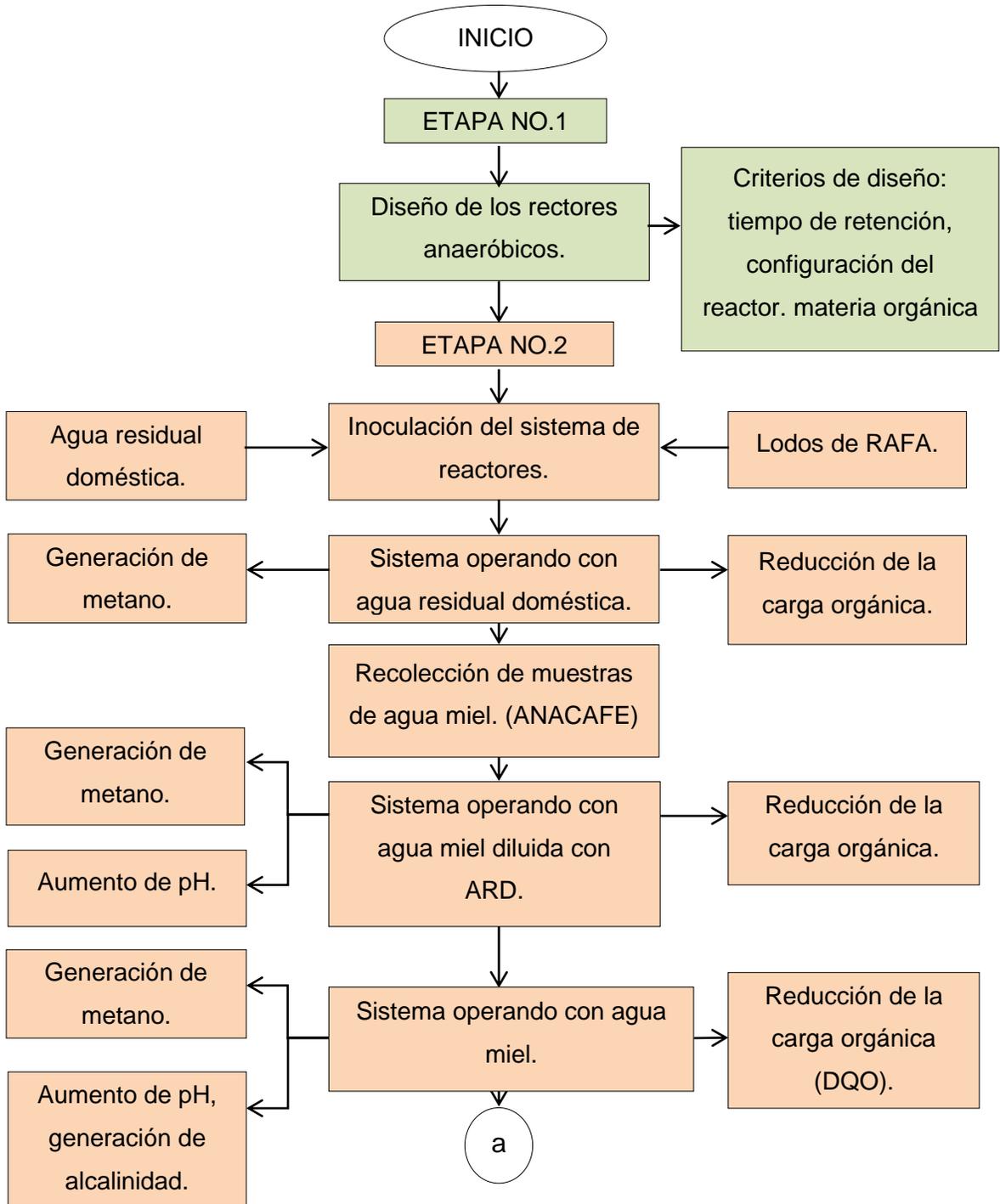
Etapa	No.	Actividad o tarea	Material, equipo o suministro
Gabinete	1	Diseño de los reactores anaeróbicos.	Material de escritura, bibliografía de consulta.
Campo	1	Recolección de muestras de aguamiel.	Recipientes de ½ litro, 1 litro y 1 galón.
Experimental	1	Construcción del reactor anaeróbico.	Tubería de PVC, lodos, accesorios de PVC, mangueras, pegamento. Planchas de acrílico.

Continuación tabla VIII.

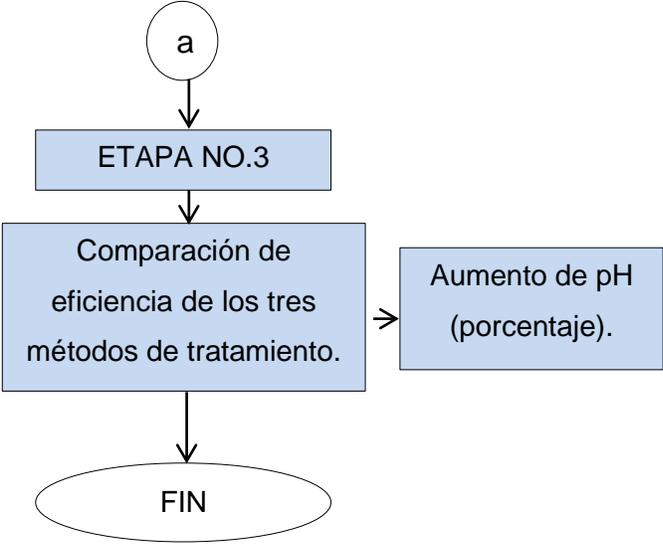
	2	Construcción del equipo para evaluar los otros dos tratamientos.	Tubería de PVC, cal, piedra caliza.
Laboratorio	1	Evaluación de la eficiencia de los reactores anaeróbicos.	Kit para determinar DQO, potenciómetro, ácido sulfúrico, kit para determinar DBO ₅ .
	2	Comparación de eficiencia entre tratamientos.	Potenciómetro.

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Procesos que conforman la investigación**



Continuación figura 4.



Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Operacionalización de variables

Tabla IX. Operacionalización de las variables

Variables	Indicador	Dato
Acidez del aguamiel cruda.	Concentración de iones hidronio.	6<pH<7 Neutro.
Acidez del aguamiel tratada en el reactor anaeróbico.	Concentración de iones hidronio.	6<pH<7 Neutro.
Eficiencia del reactor.	Porcentaje de la relación entre el pH de entrada y el pH de salida.	Porcentaje de pH.
Concentración de iones de carbonatos en el aguamiel cruda.	Alcalinidad.	Concentración de carbonatos (mg/L).
Concentración de iones de carbonatos en el aguamiel tratada en el reactor anaeróbico.	Alcalinidad.	Concentración de carbonatos (mg/L).
Reducción química de la carga orgánica en el aguamiel cruda.	Degradación química del oxígeno en el agua, degradación bioquímica del oxígeno en el agua.	DQO (mg/L). DBO ₅ (mg/L).
Reducción química de la carga orgánica en el aguamiel tratada.	Degradación química del oxígeno en el agua, degradación bioquímica del oxígeno en el agua.	DQO (mg/L). DBO ₅ (mg/L).
Temperatura.	Temperatura del agua.	Temperatura ambiente (variable, no se controla).

Continuación tabla IX.

Eficiencia del tratamiento con cal.	Porcentaje de la relación entre el pH de entrada y el pH de salida.	Porcentaje de pH.
Eficiencia del tratamiento con piedra caliza.	Porcentaje de la relación entre el pH de entrada y el pH de salida.	Porcentaje de pH.

Fuente: elaboración propia.

2.1.5. Metodología estadística

A continuación se detalla la metodología estadística aplicada para evaluar los resultados de la investigación, en función de las distintas etapas en las que se dividió el trabajo.

2.1.5.1. Primera etapa: diseño de los reactores anaeróbicos

No fue necesario llevar a cabo ningún tipo de análisis estadístico.

2.1.5.2. Segunda etapa: operación de los reactores

- Tipo de análisis estadístico: determinación del tamaño de la muestra (número de veces que se repetirá el experimento).
- Objetivo: calcular el número de veces que se repetirá el análisis de la variable de diseño.
- Variables de diseño: potencial de hidrógeno.

- Procedimiento analítico: determinación del número de muestras mediante la siguiente ecuación:

$$n = \left(\frac{z_{\alpha/2}}{E} \right)^2 \left(\frac{S}{E} \right)^2$$

Donde:

n= tamaño de la muestra (repeticiones)

$z_{\alpha/2}^2$ = área bajo la curva normal

s = desviación estándar

e= error por estimación

Tabla X. **Tamaño de la muestra**

Parámetro	UASB	ABR
Parámetro	Potencial de hidrógeno	Potencial de hidrógeno
Nivel de confianza	95%	95%
Nivel de significancia (a)	0.05	0.05
Relación S/E	1.67	1.22
$\frac{z_{\alpha}}{2}$	1.96	1.96
N	11	6
Punto de muestreo	Entrada y salida del reactor	Entrada y salida del reactor

Fuente: elaboración propia.

Nota: la diferencia en el número de muestras entre reactores se trabajó de esta manera debido a los problemas de acceso al aguamiel y al tiempo de retención del reactor tipo ABR, el cual excedía significativamente al tiempo de retención del reactor tipo UASB.

Además de la determinación del tamaño de la muestra es necesario determinar si el tratamiento diseñado realmente infirió sobre la magnitud del potencial de hidrógeno del aguamiel con la que se trabajó. Para evaluar esto se planteó el siguiente análisis estadístico:

- Tipo de análisis estadístico: prueba de hipótesis para la razón de dos variables.
- Objetivo: determinar si la varianza de dos poblaciones son iguales, si lo fueran implicaría que el tratamiento no modificó la magnitud de las variables estudiadas.
- Variables a analizar: potencial de hidrógeno.
- Procedimiento: en primer lugar se plantean dos hipótesis, la finalidad de este análisis estadístico es validar una de las dos.

Hipótesis nula: las dos poblaciones son iguales, el tratamiento no tuvo ningún efecto sobre el aguamiel.

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

Hipótesis alterna: las poblaciones no son iguales, el tratamiento tuvo inferencia sobre la magnitud de las variables analizadas.

$$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

- Estadístico de prueba/ comparador: F de Fischer.
- Regla de decisión:
Si la F calculada es mayor que la F tabulada, se rechaza la hipótesis nula.
Si la F calculada es menor que la F tabulada, se acepta la hipótesis nula.

Nota: esta prueba también se aplicó al resto de variables estudiadas.

2.1.6. Tercera etapa: comparación de eficiencia entre tratamientos

En primer lugar se evaluó, estadísticamente, si los tratamientos analizados aportan distintos resultados, para ello se realizó el siguiente análisis:

- Tipo de análisis estadístico: análisis de varianza (ANDEVA).
- Objetivo: verificar que los resultados obtenidos utilizando los tres tratamientos son distintos.
- Variables a analizar: potencial de hidrógeno.
- Procedimiento: en primer lugar se plantean dos hipótesis, la finalidad de este análisis estadístico es validar una de las dos.
 - Hipótesis nula: todos los tratamientos son iguales.
 - Hipótesis alterna: los tratamientos son distintos.
- Comparador: F de Fischer.
- Tipo de diseño: diseño experimental en bloques al azar.

Si la ANDEVA determina que los resultados son distintos, se procede a determinar, estadísticamente, cuál de los tratamientos ofrece el mejor resultado.

- Tipo de análisis estadístico: prueba de Tuckey, prueba de medias.
- Objetivo: determinar cuál de los tratamientos ofrece el mejor resultado.

Resumiendo los análisis estadísticos que se realizaron a los datos obtenidos durante la investigación:

Tabla XI. **Análisis estadísticos por etapas de la investigación**

Etapa	Análisis
Primera etapa	No aplica
Segunda etapa	Determinación del tamaño de la muestra
	Prueba de hipótesis para la razón de dos variables
Tercera etapa	ANDEVA
	Prueba de Tukey

Fuente: elaboración propia.

2.1.7. Diseño y construcción de los reactores anaeróbicos

2.1.7.1. Descripción de las partes que conforman el sistema

Se construyeron dos tipos de reactores anaeróbicos, a nivel laboratorio. El primero consistió en un reactor tipo UASB y el segundo reactor es tipo ABR. Ambos reactores son alimentados por una bomba peristáltica, que permite controlar el caudal que ingresa a ambos sistemas.

Figura 5. **Sistema de alimentación de aguamiel al reactor**



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

La bomba peristáltica está conectada a un recipiente, en donde se encontraba contenida la muestra de aguamiel que sería tratada. El sistema de mangueras que conectaba a la bomba, el reactor y el recipiente de almacenaje de la muestra contaba con válvulas antirretorno, que aseguraban que el agua no se movería en la dirección contraria al flujo establecido con la bomba.

El reactor UASB diseñado para hacer esta investigación consiste en una tubería de PVC que permite el ingreso del aguamiel por la parte inferior del mismo. Dentro de la tubería se colocó un lecho de lodos, provenientes del UASB instalado en la planta de tratamiento Ing. Arturo Pazos Sosa. El aguamiel, luego de ingresar al tubo de PVC, atraviesa el lecho de lodos y asciende, para luego salir del dispositivo.

El reactor tipo ABR también cuenta con un lecho de lodos, que proviene del mismo reactor antes mencionado, pero en su estructura se colocaron baffles

que permiten re-direccionar el flujo de agua, aumentando la agitación de la misma dentro del reactor.

Ambos reactores fueron conectados, por medio de mangueras, a recipientes que permitieran medir la cantidad de metano generado. Sin embargo no se observó la formación de ningún tipo de gas durante el funcionamiento de ambas unidades.

Figura 6. **Sistema de tratamiento de aguamiel a escala laboratorio**



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 7. **Dispositivo de separación y medición de metano**



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

2.1.8. Descripción de los reactores

2.1.8.1. Reactor ABR

El reactor anaeróbico con baffles es un dispositivo construido de acrílico con un volumen de 40 L que posee ocho compartimientos dentro de los cuales se llevan a cabo las diferentes fases de la digestión anaeróbica, las cuales son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; en cada compartimiento se encuentra un juego de baffles o deflectores que le dan la dirección al fluido, el espaciamiento de deflectores tiene una proporción de 2 a 1, en donde el deflector que conduce al agua hacia abajo tiene la mitad de

espaciamiento que el deflector que conduce al gua hacia arriba, esto se traduce en áreas y por consiguiente en velocidades, es decir que cuando el aguamiel lleva un movimiento descendiente viaja al doble de velocidad que cuando asciende.

El reactor ABR posee una tapadera movable para poder ingresar los lodos que inoculan el sistema, además en la tapadera se encuentra una salida de gas por cada compartimiento debido que dentro del ABR ocurren reacciones que producen biogás.

Cuando el aguamiel es impulsada por la bomba peristáltica e ingresa al reactor, se van llenando uno a uno los compartimientos con movimientos descendentes y ascendentes; en la parte inferior se encuentra un lecho de lodos provenientes de un biodigestor que trata agua residual de tipo doméstico, estos lodos se utilizaron para inocular el sistema y disminuir el tiempo de arranque.

El agua miel al estar en contacto con el lecho de lodos cuando pasa por la parte inferior del reactor, degrada la materia orgánica del agua residual durante el recorrido de cada compartimiento y se crea un movimiento constante similar a una agitación por el efecto de los deflectores. Aunado a esto, se puede determinar la generación de metano en el reactor por medio de un dispositivo de desplazamiento de agua.

Figura 8. Reactor ABR con baffles inferiores



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

2.1.8.2. Reactor UASB

Este reactor fue construido con tubería de PVC, y tiene una capacidad para almacenar un volumen de 5L. El diseño se hizo de tal manera que permitiera que el agua residual ingresara por la parte inferior del dispositivo. A continuación, el agua asciende por el dispositivo, atravesando un manto de lodos, los cuales se encuentran sostenidos sobre una malla colocada en forma perpendicular al flujo del agua. La finalidad de colocar los lodos dentro del dispositivo es de inocular el sistema, es decir, utilizar los microorganismos presentes en él para degradar la materia orgánica del agua residual que se va a tratar.

Figura 9. **Acoples de entrada al reactor UASB**



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 10. **Campana para recolección de biogás**



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Figura 11. Reactor UASB



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

2.1.9. Parámetros de diseño para cada reactor

Para el diseño de los reactores se parte de la aplicación de algunos parámetros fundamentales para su funcionamiento y dimensionamiento. Los cuales se basan principalmente en literatura y otras investigaciones realizadas con anterioridad y se definen a continuación.

2.1.9.1. Tiempo de retención hidráulica

Es el tiempo que tarda en recorrer el aguamiel todo el reactor. Este parámetro fue la base para determinar el volumen de los reactores que se construyeron. En un principio se propuso que los reactores funcionaran con el tiempo mínimo de retención recomendado en la bibliografía consultada, en el caso del ABR 44 horas, y en el caso del UASB 5 horas. Una vez puestos en marcha los reactores, se observó que estos tiempos de retención no permitían que se provocaran cambios significativos en la calidad del agua tratada, por ello fueron modificados. Para obtener los datos reportados en este informe se utilizó en el UASB un tiempo de retención de 54.67 horas y un tiempo de retención para el ABR de 7.8 días. Si bien estos tiempos de retención son muy grandes en comparación a los utilizados tradicionalmente, se eligieron debido al tamaño de los reactores y debido a la cantidad de aguamiel con la que se tendría que hacer la prueba, dado el hecho de que acceder a este tipo de agua residual en la ciudad de Guatemala es difícil y se tendría que haber hecho recolecciones de manera frecuente; estos tiempos de retención permitían manejar muestras más pequeñas de aguas por períodos de tiempo más largos. Los tiempos de retención se modificaron cambiando el caudal de agua que circulaba por los sistemas, ya que el diseño de la bomba peristáltica utilizada en el experimento permitió hacer esta modificación.

2.1.9.2. Caudal

Es el volumen de aguamiel que ingresa al sistema en un tiempo determinado. Como se mencionó anteriormente, para poder controlar este parámetro se utilizó una bomba peristáltica.

2.1.10. Calibración del caudal

A pesar de que el diseño de la bomba peristáltica utilizada en el trabajo de investigación permitía modificar el caudal que circulaba por los sistemas, se intentó reducir este caudal utilizando una serie de combinaciones de mangueras de diferentes diámetros y abrazaderas que estrangularan el flujo. A continuación se muestran los resultados de tales modificaciones.

Tabla XII. Pruebas preliminares de caudal

	Volumen (mL)	Tiempo (s)	Q (mL/s)	Q (L/h)		
Manguera nueva, sin estrangulamiento	25	6.00	4.17	15.00		
	25	7.83	3.19	11.49		
	25	7.02	3.56	12.82	Mayor (L/h)	15.00
	25	11.55	2.16	7.79	Menor (L/h)	6.55
	25	13.75	1.82	6.55	Promedio (L/h)	10.73
Manguera nueva, estrangulamiento 1	25	9.31	2.69	9.67		
	25	8.57	2.92	10.50		
	25	8.18	3.06	11.00	Mayor (L/h)	11.00
	25	8.63	2.90	10.43	Menor (L/h)	9.67

Continuación tabla XII.

	25	8.87	2.82	10.15	Promedio (L/h)	10.35
Manguera nueva, estrangulamiento 2	10	53.07	0.19	0.68		
	10	66.00	0.15	0.55		
	10	61.80	0.16	0.58	Mayor (L/h)	0.68
	10	52.74	0.19	0.68	Menor (L/h)	0.55
	10	63.60	0.16	0.57	Promedio (L/h)	0.61
Manguera nueva+manguera de pecera	25	9.85	2.54	9.14		
	25	9.93	2.52	9.06		
	25	8.17	3.06	11.02	Mayor (L/h)	11.02
	25	9.11	2.74	9.88	Menor (L/h)	9.06
	25	9.39	2.66	9.58	Promedio (L/h)	9.74
Manguera nueva+manguera de pecera+abrazadera	10	88.80	0.11	0.41		
	10	75.60	0.13	0.48		
	10	72.60	0.14	0.50	Mayor (L/h)	0.50
	10	84.00	0.12	0.43	Menor (L/h)	0.41
	10	72.00	0.14	0.50	Promedio (L/h)	0.46

Fuente: elaboración propia.

Aunque estas modificaciones permitían reducir el caudal del flujo, su implementación implicaba provocar fugas en distintas partes del sistema, por ello estas opciones fueron descartadas.

La bomba peristáltica utilizada, está diseñada de manera que permite manipular el tiempo durante el cual rotan sus rodillos, haciendo pausas constantes y modificando así el caudal.

Figura 12. Bomba peristáltica



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Estos son los resultados de la calibración de las distintas combinaciones de velocidad y tiempo de espera entre giros, que se podían programar en el equipo utilizado.

Tabla XIII. Calibración del caudal

<i>Operate</i>	<i>Wait</i>	Volumen (ml)	Tiempo (seg)	Q (mL/seg)	Q (L/seg)	Q (L/h)	Promedio (L/h)
0	1	4	62.52	0.0640	0.0001	0.2303	0.1926
0	1	3	69.52	0.0432	0.0000	0.1554	
0	1	3.5	65.56	0.0534	0.0001	0.1922	
0	2	7.5	63.83	0.1175	0.0001	0.4230	0.5093
0	2	9.5	63.76	0.1490	0.0001	0.5364	
0	2	10.1	63.95	0.1579	0.0002	0.5686	
0	3	10	64.37	0.1554	0.0002	0.5593	0.5566
0	3	10	64.79	0.1543	0.0002	0.5556	
0	3	10	64.87	0.1542	0.0002	0.5550	
0	4	15	68.39	0.2193	0.0002	0.7896	0.7977

Continuación tabla XIII.

0	4	15	67.02	0.2238	0.0002	0.8057	
0	4	15	66	0.2273	0.0002	0.8182	
0	5	20	132.93	0.1505	0.0002	0.5416	0.8897
0	5	20	69.32	0.2885	0.0003	1.0387	
0	5	20	66.13	0.3024	0.0003	1.0888	
0	6	15	4.67	3.2120	0.0032	11.5632	11.7162
0	6	15	4.29	3.4965	0.0035	12.5874	
0	6	15	4.91	3.0550	0.0031	10.9980	
0	7	15	5.21	2.8791	0.0029	10.3647	12.6161
0	7	15	3.89	3.8560	0.0039	13.8817	
0	7	15	3.97	3.7783	0.0038	13.6020	
0	8	15	3.67	4.0872	0.0041	14.7139	12.1968
0	8	15	7.01	2.1398	0.0021	7.7033	
0	8	15	3.81	3.9370	0.0039	14.1732	
0	9	20	4.03	4.9628	0.0050	17.8660	17.1283
0	9	20	4.43	4.5147	0.0045	16.2528	
0	9	20	4.17	4.7962	0.0048	17.2662	
0	10	20	5.99	3.3389	0.0033	12.0200	11.3771
0	10	20	6.24	3.2051	0.0032	11.5385	
0	10	20	6.81	2.9369	0.0029	10.5727	
0	11	20	7.27	2.7510	0.0028	9.9037	11.0557
0	11	20	6.19	3.2310	0.0032	11.6317	
0	11	20	6.19	3.2310	0.0032	11.6317	

Fuente: elaboración propia.

2.1.11. Memoria de cálculo del diseño

- **Reactor ABR**

Para el diseño y dimensionamiento del reactor ABR a escala laboratorio, se partió de los parámetros de tiempo de retención hidráulica y caudal para determinar el volumen del reactor. En este caso se utilizó un caudal de 0.9 L/h y 44 horas de retención hidráulica.

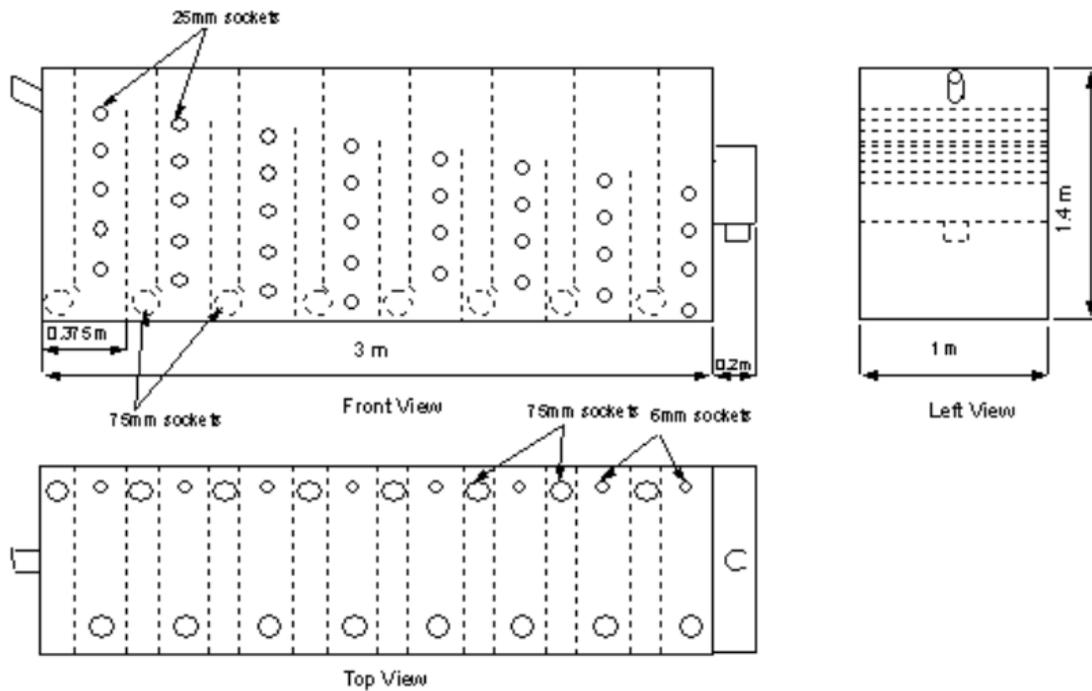
$$\frac{0.9 L}{h} * 44 h = 40 L \approx 0.04 m^3$$

El diseño se basa en investigaciones realizadas anteriormente, específicamente en un estudio realizado en la Escuela de Ingeniería química de la Universidad de Natal, en el que se construyó un reactor con baffles a escala laboratorio con un volumen efectivo de 10 L y 8 compartimientos. Sin embargo, en el diseño implementado no se utilizó dicho volumen (10L) por la capacidad de caudales que tiene la bomba peristáltica, en vez de ello tuvo como base el tiempo de retención en rango ideal que se encuentra en la literatura, y dio como resultado un volumen de 40 L; respecto al diseño de baffles y 8 compartimientos sí se utilizaron en la investigación.

En cuanto a lo que respecta a las dimensiones del reactor y su relación entre largo, alto y ancho, no se encontraron detalles específicos en la información de la Universidad de Natal, por lo que se tomó en cuenta el reporte de la comisión de investigación del agua: *“The evaluation of the anaerobic baffled reactor for sanitation in dense peri-urban settlements”* realizada por el grupo de investigadores de contaminación de la Universidad de KwaZulu-Natal en Durban y el Centro de Investigación de Agua y Agua Residual del Instituto Tecnología de Durban, en la que se construyó un reactor a escala planta piloto que tiene como base el reactor a nivel laboratorio realizado por la Universidad en mención.

Al tener un esquema de las medidas del reactor a nivel planta piloto se pudo determinar que la relación entre las dimensiones era que el alto del reactor es 1.4 veces el ancho, mientras que el largo equivale a 3 veces su ancho.

Figura 13. Esquema del diseño del reactor a nivel planta piloto



Fuente: COMISIÓN DE INVESTIGACIÓN DEL AGUA. *The evaluation of the anaerobic baffled reactor for sanitation in dense peri-urban settlements*. p.36.

Con la información obtenida de otras investigaciones se realiza el cálculo de las dimensiones del reactor y la fórmula del volumen de un rectángulo.

$$V = a * h * L$$

Donde:

V= volumen del reactor (m³)

a= ancho del reactor ABR (m)

h= alto del reactor ABR (m)

L= largo del reactor ABR (m)

Tabla XIV. **Proporción de las dimensiones del reactor**

Volumen	0.04 m ³
Ancho	A
Alto	1.4 a
Largo	3 a

Fuente: elaboración propia.

La ecuación anterior se puede simplificar de la siguiente manera:

$$0.04 \text{ m}^3 = a * 1.4a * 3a$$

$$0.04 \text{ m}^3 = 4.2 a^3$$

$$\left(\frac{0.04 \text{ m}^3}{4.2}\right)^{1/3} = a$$

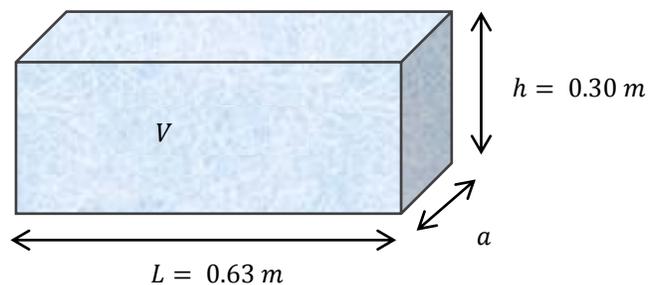
$$a = 0.21 \text{ m}$$

Se tiene un reactor de 21 cm de ancho, sustituyendo las proporciones para alto y largo se tiene:

$$h = 1.4 * 0.21 \text{ m} = 0.30 \text{ m}$$

$$L = 3 * 0.21 \text{ m} = 0.63 \text{ m}$$

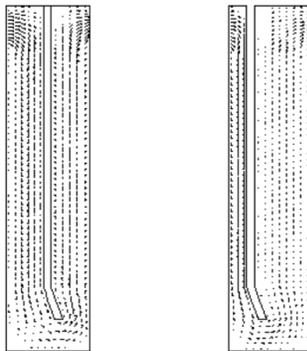
Figura 14. **Dimensiones ABR**



Fuente: elaboración propia.

La parte interior del reactor ABR está conformada por ocho compartimientos, cada uno de ellos posee un juego de baffles; primero uno que conduce el agua hacia abajo y luego otro que conduce el agua hacia arriba. Para determinar la distancia de separación entre cada uno de ellos se tomó de base el reporte de la Comisión de Investigación del Agua, en donde se realizaron modelaciones computacionales y prototipos de laboratorio del comportamiento del agua al pasar por el baffle, así como la comparación entre dos posiciones de baffles para determinar el espaciamiento óptimo entre ellos, de manera que permitieran menos puntos muertos y un flujo uniforme.

Figura 15. **Perfiles de los vectores de velocidad en los deflectores**



Fuente: COMISIÓN DE INVESTIGACIÓN DEL AGUA. *The evaluation of the anaerobic baffled reactor for sanitation in dense peri-urban settlements*. p.34.

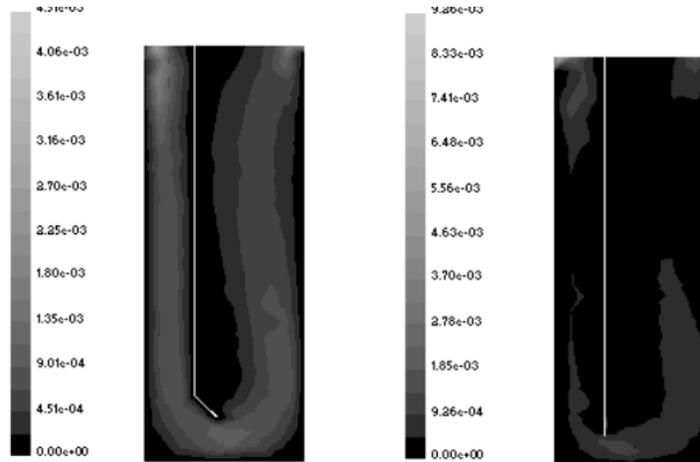
En la imagen se puede observar la comparación de los vectores de velocidad en dos posiciones de los deflectores dentro de uno de los compartimientos del reactor. La primer imagen, cuando el deflector se encuentra en el centro del compartimiento; esto significa que el área del compartimiento del lado en que el flujo va hacia abajo es igual al área del compartimiento del lado en que el flujo va hacia arriba. La segunda imagen, cuando el deflector se encuentra a una distancia de un tercio del inicio del compartimiento; esto significa que el área del compartimiento del flujo

ascendente es el doble que el área del compartimiento del flujo descendente. Se puede observar que la longitud de los vectores de velocidad tienen una distribución más uniforme en la segunda imagen, pero que a la vez genera espacio muerto en la región de flujo ascendente.

Además, para el diseño de un reactor ABR es esencial que las velocidades del flujo ascendente sean bajas para que no exista arrastre de sólidos que se encuentran en el fondo del reactor. Para lograr una baja velocidad teniendo el caudal constante es necesario modificar el área, ya que si hay mayor área la velocidad disminuye. Sin embargo, existe el inconveniente de un mayor volumen de espacio muerto.

En la modelación realizada en el reporte de la Comisión de Investigación del Agua se muestran deflectores con ángulo al final que se utilizan para obtener una mayor tasa de flujo. Se tomó ese mismo modelo de forma para los deflectores con ángulo de 45° para el diseño del ABR de la presente investigación, ya que se fundamentan en investigaciones sólidas y con software especializado. A continuación se muestra la comparación entre un deflector convencional totalmente recto y otro que termina con un ángulo de inclinación. El color negro representa las bajas tasas de flujo que indican que el movimiento en esos sectores es mínimo o incluso muerto.

Figura 16. **Comparación entre dos formas de deflectores**



Fuente: COMISIÓN DE LA INVESTIGACIÓN DEL AGUA. *The evaluation of the anaerobic baffled reactor for sanitation in dense peri-urban settlements*. p.35.

Con base en lo anterior se definió para la relación de espacios entre deflectores de flujo hacia abajo y flujo hacia arriba 1:2 y la distancia se define según la longitud total y sus 8 compartimientos. Se tomó en cuenta el grosor del acrílico de 3 mm para el cálculo.

$$\text{Longitud de compartimientos} = \frac{0.63 \text{ m} - 7(0.003\text{m})}{8} \cong 0.075 \text{ m}$$

Tabla XV. **Proporción de espacios entre deflectores**

Espacio para flujo descendente	x
Espacio para flujo ascendente	2 x

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Longitud de compartimientos} = x + 2x$$

$$0.075 \text{ m} = 3x$$

$$0.025 \text{ m} = x$$

$$\text{Espacio de deflector para flujo descendente} = 0.025 \text{ m}$$

$$\text{Espacio de deflector para flujo ascendente} = 0.05 \text{ m}$$

En la parte final del reactor se colocó un compartimiento aislado para la recolección y toma de muestras, que tiene el mismo ancho que el reactor, una altura de 0.1 m de alto y 0.075 m de largo.

Para la entrada y salida del agua residual se perforó un orificio de 1 cm de diámetro en la cara frontal y trasera, ambos con una altura desde la base de 25 cm; y para la salida de gas se perforaron 8 orificios (uno para cada compartimiento) de 0.7 cm de diámetro en la tapadera del reactor. A cada uno se le colocó una manguera para la conducción del biogás.

Con esto se concluye el dimensionamiento del reactor ABR y a continuación se presenta la recolección de datos que se fueron obteniendo paso a paso.

Tabla XVI. **Dimensionamiento del reactor ABR**

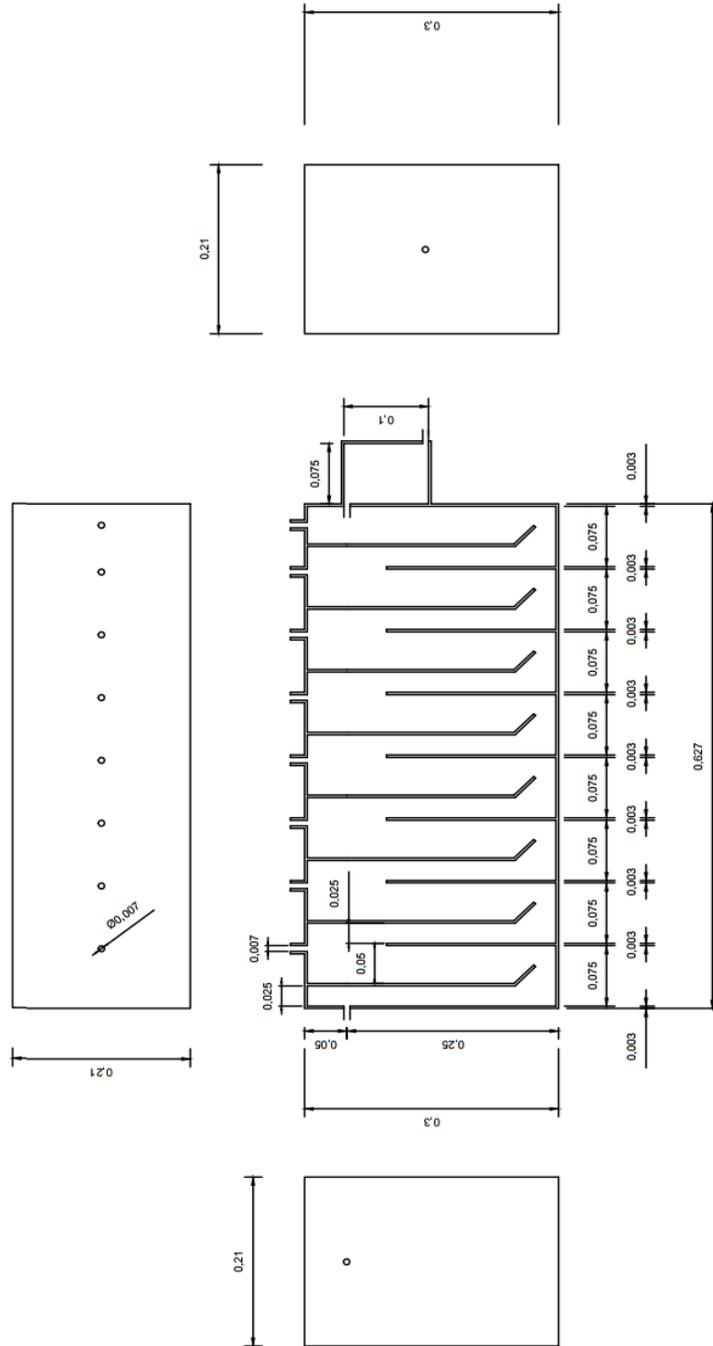
Reactor ABR	
Caudal	0.91 L/h
Tiempo de retención	44 h
Volumen reactor	0.04 m ³
Ancho	0.21 m

Continuación tabla XVI.

Alto	0.30 m
Longitud	0.63 m
Número de compartimientos	8
Tipo de deflector	Ángulo de inclinación de 45°
Espacio entre deflector para flujo descendente	0.025 m
Espacio entre deflector para flujo ascendente	0.05 m
Diámetro de orificio de entrada y salida de agua	0.01 m
Altura de orificio de entrada	0.25 m
Altura de orificio de salida	0.25 m
Diámetro de orificios de salida de biogás	0.007 m
Caja receptora para toma de muestras	
Ancho	0.21 m
Alto	0.1 m
Longitud	0.07 m
Diámetro de orificio de entrada y salida de agua	0.01 m
Altura de orificio de entrada	0.25 m
Altura de orificio de salida	0.14 m

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Esquema del reactor ABR



Fuente: elaboración propia.

- **Reactor UASB**

Para el diseño y dimensionamiento del reactor UASB a escala laboratorio se partió de los parámetros de tiempo de retención hidráulica y caudal para determinar el volumen del reactor. En este caso se utilizó un caudal de 0.91 L/h y 5 horas de retención hidráulica.

$$\frac{0.91 L}{h} * 5 h = 4.5 L \approx 0.0045 m^3$$

Se utilizó un tubo PVC de 4 pulgadas de diámetro, equivalente a 0.11 m de diámetro en su parte interna. Conociendo el volumen y diámetro del tubo se determinó la altura por medio de la ecuación del volumen de un cilindro:

$$V = \pi r^2 * h$$

Donde:

V= Volumen del reactor (m³)

r= radio del reactor (m)

h= altura del reactor

$$0.0045 m^3 = \pi \left(\frac{0.11 m}{2} \right)^2 * h$$

$$h = 0.47 m$$

Tabla XVII. Dimensionamiento del reactor UASB

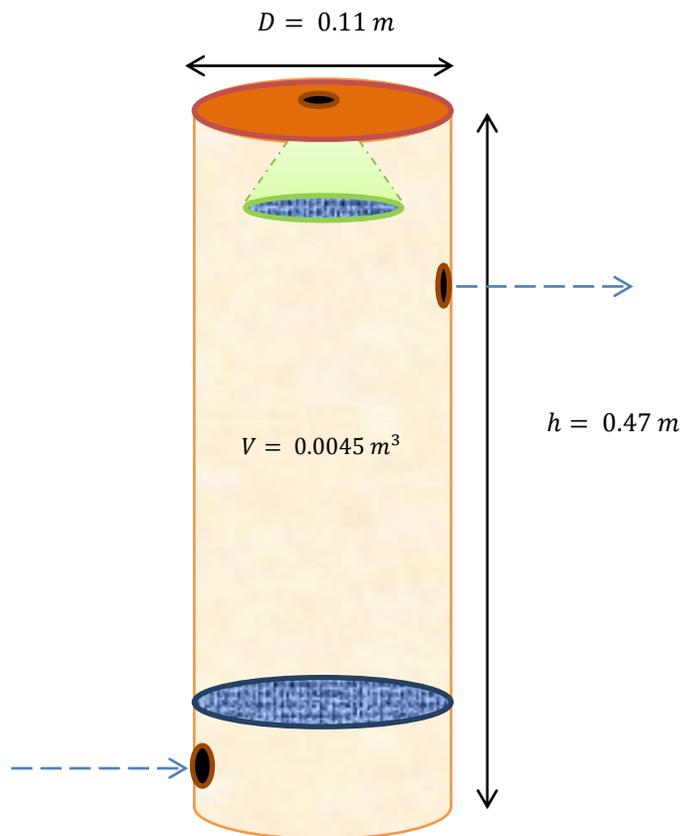
Reactor UASB	
Caudal de diseño.	0.91 L/h
Caudal operado durante la investigación.	0.2 L/h
Tiempo de retención de diseño.	5 h

Continuación tabla XVII.

Tiempo de retención utilizado en la investigación.	54.67 h
Volumen efectivo del reactor.	0.0045 m ³
Volumen tomando en cuenta los acoples a la entrada y a la salida.	0.01093 m ³
Diámetro.	4 pulgadas (0.11 m)
Altura efectiva.	0.47 m

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Esquema del reactor UASB**



Fuente: elaboración propia.

2.1.12. Materiales utilizados para la construcción del sistema de tratamiento

- Construcción de UASB:
 - Materiales:
 - ✓ Tubo de PVC 4 pulgadas (1 metro)
 - ✓ Tee para drenaje 4 pulgadas (2 unidades)
 - ✓ Reductor de PVC 4 pulgadas a 2 pulgadas (2 unidades)
 - ✓ Reductor de PVC 2 pulgadas a $\frac{3}{4}$ de pulgada (2 unidades)
 - ✓ Adaptador de PVC para $\frac{3}{4}$ de pulgada (2 unidades)
 - ✓ *Bushing* de hierro $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{4}$ de pulgada (2 unidades)
 - ✓ Adaptador de manguera de $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{8}$ de pulgada (2 unidades)
 - ✓ Tapadera de PVC 4 pulgadas (2 unidades)
 - ✓ Embudo plástico (1 pulgada)
 - ✓ Manguera ámbar de $\frac{1}{4}$ de pulgada
 - ✓ Válvulas antirretorno para pecera (2 unidades)
 - ✓ Pajilla de plástico (1 unidad)
 - ✓ Botella con capacidad para medio litro (1 unidad)
 - ✓ Corcho (1 unidad)
 - ✓ Pegamento para PVC
 - ✓ Silicón frío
 - ✓ Cedazo de fibra de vidrio azul
 - ✓ Láminas de aluminio
 - ✓ Bomba peristáltica
 - ✓ Teflón
 - ✓ Soporte universal
 - ✓ Abrazaderas metálicas
 - ✓ Manguera plásticas de $\frac{1}{8}$ de pulgada
 - ✓ Recipientes de plástico para capacidad de 1 litro y medio litro.

2.1.13. Procedimiento de la construcción

Se utilizó un tubo de PVC de 4 pulgadas y en su base se colocó una tapadera del mismo material. Sobre esta base se colocó una malla de cedazo para que se retuvieran sobre ella los lodos. La entrada y la salida del dispositivo se hicieron utilizando accesorios de PVC tipo “Tee”, esto permitió colocar acoples, que a la vez hicieron posible la conexión del sistema con la bomba peristáltica por medio de mangueras. Además de las mangueras, se adicionaron al sistema válvulas antirretorno. En la parte superior del dispositivo se colocó otra tapadera de PVC, en la superficie interior de ella se pegó el embudo plástico que haría las veces de la campana para atrapar los gases del reactor. La tapadera fue perforada para poder colocar una pajilla plástica que transportara el gas generado desde el reactor hasta una botella con agua. La botella de agua se colocó en el sistema con el fin de detectar si se generaba gas. Dentro del reactor, al final del volumen efectivo, se colocaron láminas de aluminio que hicieran las veces de baffles e impidieran el arrastre de lodos hacia el interior de la campana.

El dispositivo se conectó a la bomba peristáltica por medio de una manguera de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

Para medir el volumen de gas generado se construyó otro dispositivo, que también podía ser conectado al UASB, eliminando la botella de plástico. Este dispositivo estaba constituido por dos botellas plásticas sostenidas por un soporte universal y abrazaderas. Ambas botellas estaban conectadas por su parte inferior y una de ellas estaba conectada al UASB por medio de una manguera colocada en su parte superior, de manera que, cuando se generara gas en el UASB, este fuera conducido hacia la botella y desplazara el agua que

contiene este recipiente. De esta manera, el volumen de agua desplazada, sería equivalente al volumen de gas generado en la unidad.

2.1.14. Proceso de arranque y puesta en marcha del sistema

2.1.14.1. Procedimiento de arranque

Para arrancar el equipo se hizo necesario inocularlo con lodos provenientes de un reactor UASB en funcionamiento y para aclimatar a las bacterias a su nuevo entorno, en el reactor UASB construido en el laboratorio, se hizo pasar por él agua residual doméstica. Existían dos maneras de comprobar que el sistema estaba funcionando adecuadamente, es decir, que degradaba la materia orgánica del agua residual: mediante la generación del gas metano o mediante la medición del cambio de la DQO del agua residual. Dado el hecho de que el sistema no llegó a generar metano se comparó la DQO del agua residual a la salida y a la entrada de los reactores.

2.1.14.2. Inoculación

El equipo fue inoculado con lodos provenientes del UASB instalados en la planta de tratamiento Ing. Arturo Pazos. Dentro del reactor construido a nivel laboratorio se colocó un volumen de lodos equivalente al 33.33% del volumen efectivo del reactor, es decir 1.5 L de lodos.

2.1.14.3. Calidad del agua utilizada en el arranque

Se utilizaron dos fuentes de agua para hacer funcionar el sistema, en primer lugar se usaron aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales Ing. Arturo Pazos y luego se sustituyó esta

agua por agua residual proveniente de la planta de tratamiento del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la ciudad de Guatemala.

Tabla XVIII. **Agua de inoculación**

Fuente de agua residual	Punto de muestreo	Volumen de muestreo	Calidad
Planta Ing. Arturo Pazos.	Salida del desarenador.	10 galones de agua.	Agua residual doméstica.
Planta de tratamiento USAC, ciudad de Guatemala.	Canaleta desarenadora.	1 galón de agua diaria.	Agua residual doméstica.

Fuente: elaboración propia.

2.1.14.4. Tiempo de arranque

El UASB empezó a trabajar con agua residual doméstica el día 11 de enero del 2016. Fue desconectado el día 4 de febrero y se puso a trabajar de nuevo el 6 de febrero. El reactor no generó metano, solamente produjo una disminución en la magnitud de la DQO del agua residual que ingresaba al sistema

3. RESULTADOS

Tabla XIX. **Características de los reactores**

Reactor	Características.	Magnitud
UASB	Escala.	Laboratorio
	Volumen efectivo.	0.0045 m ³
	Diámetro.	4 pulgadas (0.11 metros)
	Tiempo de retención de operación en el trabajo de investigación.	54.67 horas
	Caudal de operación en el trabajo de investigación.	0.2 L/h
	Volumen de lodos.	1.5 L
ABR	Escala.	Laboratorio
	Volumen.	0.04 m ³
	Altura.	0.3 m
	Ancho.	0.21 m
	Largo.	0.63 m
	Compartimientos.	8 (separados por deflectores)
	Tipos de deflectores.	Ángulo de inclinación de 45°
	Tiempo de retención de operación en el trabajo de investigación.	7.78 días
	Caudal de operación en el trabajo de investigación.	0.163 L/h
	Volumen de lodos.	0.0026 m ³

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Monitoreo del pH del aguamiel tratada en el UASB**

Fecha de entrada	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
04/04/2016	3.56	3.69	0.13	100% de aguamiel 25/1/2016 (agua de lavado).
13/04/2016	3.29	3.5	0.21	100% de aguamiel 24/02/2016.
16/05/2016	3.7	3.87	0.17	100% de aguamiel 17/03/2016.
18/05/2016	3.47	3.64	0.17	100% de aguamiel (muestra filtrada) 02/03/2016.
23/05/2016	3.29	3.62	0.33	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/03/2016.
13/06/2016	3.67	3.93	0.26	100% de aguamiel (muestra filtrada) 31/03/2016.
15/06/2016	3.56	3.98	0.42	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/04/2016.
20/06/2016	3.59	3.83	0.24	100% de aguamiel (muestra filtrada) 11/04/2016.
21/06/2016	3.58	3.73	0.15	100% de aguamiel (muestra filtrada) M1 (11/2+2/3).
04/07/2016	3.53	3.76	0.23	100% de aguamiel (muestra filtrada) M2 (8/3+31/3).
04/07/2016	3.42	3.62	0.2	100% de aguamiel (muestra filtrada) M3 (31/3+2/3).

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Monitoreo de la DQO del aguamiel tratada con el UASB

Fecha de entrada	DQO (mg/L) entrada	DQO (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DQO (mg/L)	Eficiencia (%)
05/04/2016	37000.00	21800.00	100% de aguamiel 25/01/2016.	15200.00	41.08
18/04/2016	27800.00	31000.00	100% de aguamiel 24/02/2016.	-3200.00	0.000
25/04/2016	28500.00	22000.00	100% de aguamiel 17/02/2016.	6500.00	22.81
18/05/2016	21100.00	16600.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 02/03/2016.	4500.00	21.33
13/06/2016	15200.00	17940.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/03/2016.	-2740.00	0.000
13/06/2016	33200.00	20460.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 31/03/2016.	12740.00	38.37
15/06/2016	14700.00	14640.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/04/2016.	60.00	0.41
20/06/2016	10900.00	14020.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 11/04/2016.	-3120.00	0.000
21/06/2016	30100.00	18180.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) (M1 17/2+2/3).	11920.00	39.60
04/07/2016	22400.00	19100.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) M2.	3300.00	14.73
04/07/2016	34100	19380	100% de aguamiel (muestra filtrada) M3.	14720.00	43.17

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Cambio de la alcalinidad de las muestras tratadas en el UASB**

Fecha de entrada	Alcalinidad entrada (mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad salida (mg/L CaCO ₃)	Muestra	Cambio (mg/L)
02/05/2016	3800.00	1560.00	17/02/2016	-2240.00
17/05/2016	3400.00	1920.00	02/03/2016	-1480.00
23/05/2016	4000.00	2160.00	08/03/2016	-1840.00
15/06/2016	4600.00	3040.00	31/03/2016	-1560.00
13/06/2016	5600.00	2680.00	08/04/2016	-2920.00
20/06/2016	3600.00	2040.00	11/04/2016	-1560.00
21/06/2016	12600.00	3080.00	M1	-9520.00
04/07/2016	13200.00	3600.00	M2	-9600.00
04/07/2016	13000.00	3480.00	M3	-9520.00

Fuente: elaboración propia

Tabla XXIII. **Comparación de la DBO₅ de las muestras ingresadas al UASB**

No.	DBO ₅ entrada (mg/L)	DBO ₅ salida (mg/L)	Condición del agua	Cambio DBO ₅ (mg/L)	Eficiencia (%)
1	29000.00	13660.00	100% aguamiel (25/01/2016).	15340.00	52.90
2	28000.00	13100.00	100% aguamiel (24/02/2016).	14900.00	53.21
3	44100.00	13340.00	100% aguamiel (02/03/2016).	30760.00	69.75

Continuación tabla XXIII.

4	27300.00	12980.00	100% aguamiel (17/03/2016).	14320.00	52.45
5	2266.44	17231.61	100% aguamiel (08/03/2016).	-14965.17	0.00
6	5099.49	11740.00	100% aguamiel (08/04/2016).	-6640.51	0.00
7	9565.71	11965.47	100% aguamiel (31/03/2016).	-2399.76	0.00
8	10740.00	11240.00	100% aguamiel (11/04/2016).	-500.00	0.00
9	19231.41	11732.16	100% aguamiel M1.	7499.25	38.99
10	12732.06	13132.02	100% aguamiel M2	-399.96	0.00
11	18798.12	19931.34	100% aguamiel M3.	-1133.22	0.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Monitoreo del potencial de hidrógeno de las muestras tratadas con el ABR

Fecha	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
16/05/2016	3.70	4.67	0.97	100% de aguamiel 17/02/2016
17/05/2016	3.36	4.51	1.15	100% de aguamiel 02/03/2016
18/05/2016	3.29	4.35	1.06	100% de aguamiel 08/03/2016
19/05/2016	3.67	4.25	0.58	100% de aguamiel 31/03/2016
20/05/2016	3.56	4.2	0.64	100% de aguamiel 08/04/2016
25/05/2016	3.59	4.07	0.48	100% de aguamiel 11/04/2016

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Monitoreo de la DQO de las muestras tratadas con el ABR**

Fecha de entrada	DQO (mg/L) entrada	DQO (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DQO (mg/L)	Eficiencia (%)
17/05/2016	28500.00	4620.00	100% de agua miel (17/02/2016).	23880.00	83.78947368
17/05/2016	22400.00	5400.00	100% de agua miel (02/03/2016).	17000.00	75.89285714
18/05/2016	15200.00	8460.00	100% de agua miel (08/03/2016).	6740.00	44.34210526
19/05/2016	33200.00	6860.00	100% de agua miel (31/03/2016).	26340.00	79.3373494
20/05/2016	14700.00	8280.00	100% de agua miel (31/03/2016).	6420.00	43.67346939
26/05/2016	10900.00	6580.00	100% de agua miel (11/04/2016).	4320.00	39.63302752

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Monitoreo del cambio de alcalinidad en las muestras tratadas con el ABR**

No.	Fecha	Alcalinidad entrada (mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad salida (mg/L CaCO ₃)	Muestra	Cambio (mg/L)
2	16/05/2016	3400.00	1880.00	17/02/2016	-1520.00
3	17/05/2016	3400.00	1960.00	02/03/2016	-1440.00
4	18/05/2016	4000.00	1600.00	08/03/2016	-2400.00
5	19/05/2016	4600.00	2400.00	31/03/2016	-2200.00
6	20/05/2016	5600.00	1640.00	08/04/2016	-3960.00
7	25/05/2016	3600.00	1520.00	11/04/2016	-2080.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Monitoreo del cambio de la DBO₅ de las muestras que ingresaron al ABR**

No.	DBO ₅ (mg/L) entrada	DBO ₅ (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DBO ₅ (mg/L)	Eficiencia (%)
1	44100.00	4350.00	100% aguamiel (02/03/2016)	39750.00	90.13
2	2266.44	4880.00	100% aguamiel (08/03/2016)	0.00	0.00
3	27300.00	2600.00	100% aguamiel (17/03/2016)	24700.00	90.48
4	9565.71	9640.00	100% aguamiel (31/03/2016)	0.00	0.00
5	5099.49	5380.00	100% aguamiel (08/04/2016)	0.00	0.00
6	10740.00	6400.00	100% aguamiel (11/04/2016)	4340.00	40.41

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Comparación del cambio de potencial de hidrógeno entre métodos**

	TRATAMIENTOS			
	UASB	ABR	Cal	Piedra caliza
MUESTRAS	Cambio de pH			
	0.13	0.97	0.91	0.05
	0.21	1.15	1.25	0.85
	0.17	1.06	0.83	0.5
	0.17	0.58	1.85	0.32
	0.33	0.64	6.83	0.75
	0.26	0.48	2.94	0.29
	0.42		2.05	0
	0.24		7.96	0.48
	0.15			
	0.23			
	0.2			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Comparación del cambio de alcalinidad entre métodos**

	TRATAMIENTOS			
	UASB	ABR	Cal	Piedra caliza
	Cambio de alcalinidad (CaCO ₃)			
MUESTRAS	-2240.00	-1520.00	1240.00	-720.00
	-1480.00	-1440.00	1920.00	320.00
	-1840.00	-2400.00	1560.00	880.00
	-1560.00	-2200.00	1680.00	-560.00
	-2920.00	-3960.00	1040.00	-160.00
	-1560.00	-2080.00	1600.00	-800.00
	-9520.00		1520.00	-40.00
	-9600.00		2760.00	440.00
	-9520.00			

Fuente: elaboración propia.

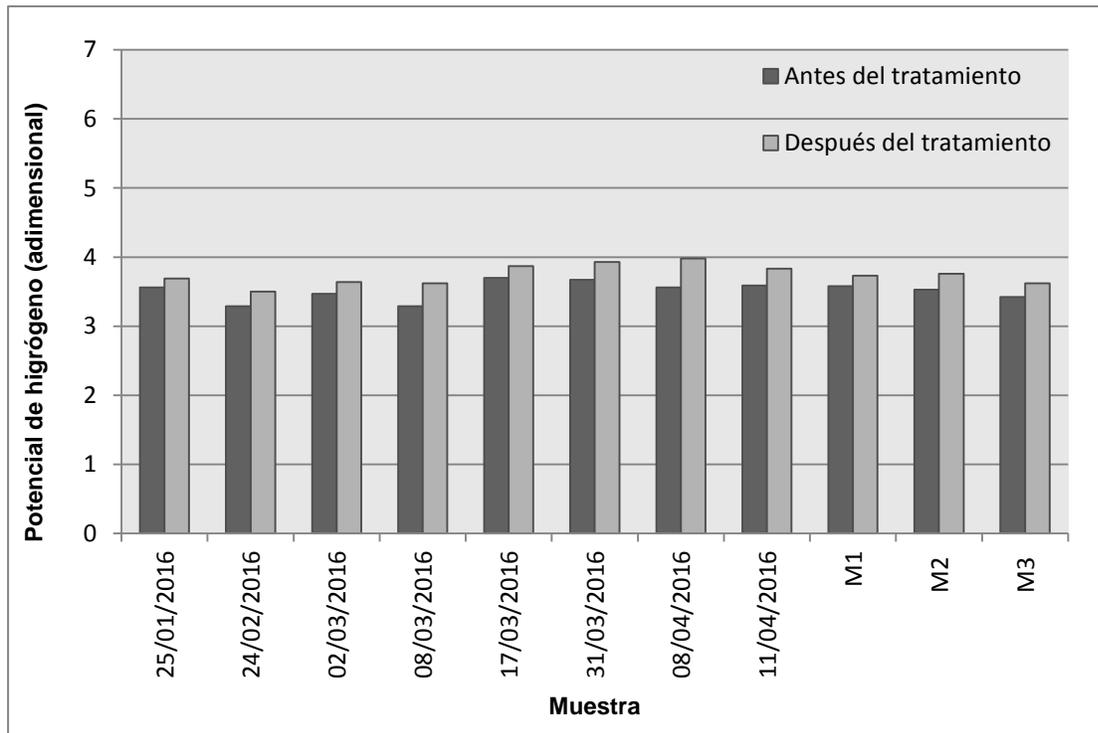
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Cambio del potencial de hidrógeno

Ambos reactores, el UASB y el ABR, fueron diseñados con el objetivo principal de crear un tratamiento para el aguamiel que pudiera aumentar el potencial de hidrógeno de este tipo de agua residual, sin la necesidad de adicionarle compuestos químicos o utilizar agitación mecánica para mejorar la eficiencia del tratamiento.

En el caso del UASB, se seleccionaron 11 pares de muestras, tomadas a la entrada y a la salida del reactor, para llevar a cabo una prueba de diferencia de medias apareadas y así determinar si existía o no una diferencia significativa en sus magnitudes, es decir, probar estadísticamente que el tratamiento sí afectaba el valor del potencial de hidrógeno del aguamiel. La siguiente gráfica muestra los resultados de la evaluación del cambio del potencial de hidrógeno.

Figura 19. **Cambio del potencial de hidrógeno del aguamiel tratada en el UASB**



Fuente: elaboración propia.

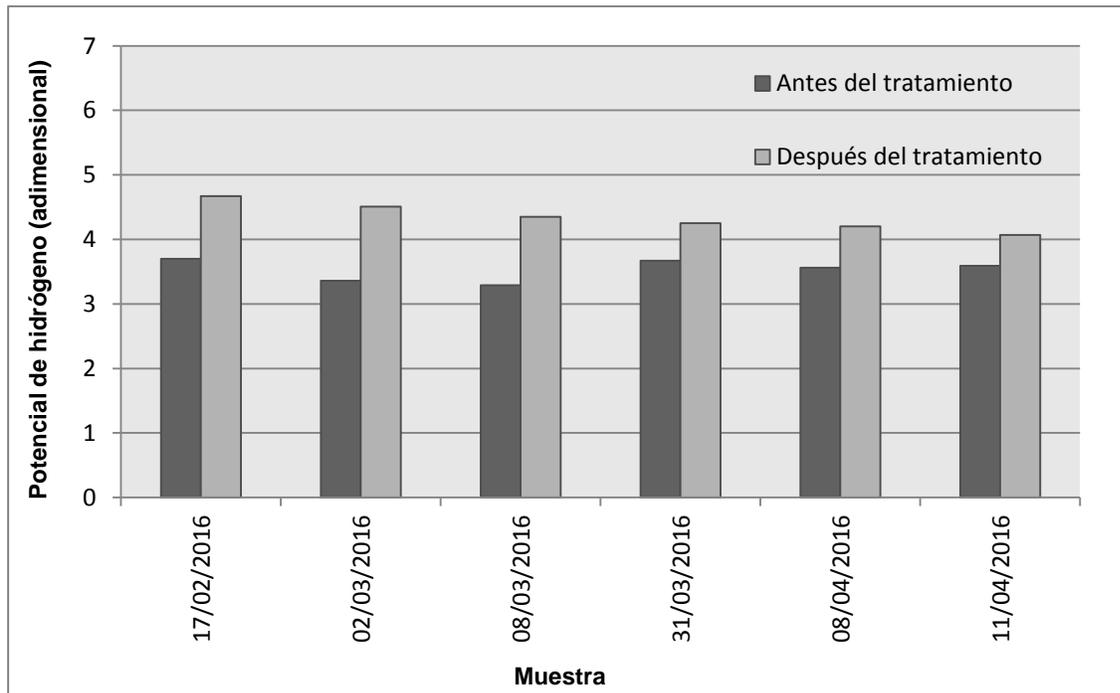
En la gráfica se puede observar que el potencial de hidrógeno de todas las muestras se incrementa en un promedio de 0.23 unidades y que la eficiencia promedio del tratamiento para elevar el potencial de hidrógeno fue de 6%. El análisis de la diferencia de medias apareadas, comparadas por medio de la t de Student, realizado con un nivel de confianza del 95%, demostró que sí existía una diferencia significativa en la magnitud del potencial de hidrógeno del aguamiel, lo cual implica que este tratamiento sí elevó su potencial de hidrógeno. Este tipo de análisis estadístico también permitió evaluar si el tratamiento fue capaz de elevar el potencial de hidrógeno del aguamiel lo suficiente como para alcanzar un valor neutral. Dado el hecho de que el

aguamiel, sin tratamiento, tiene un potencial de hidrógeno cercano a las 3 unidades, elevar este parámetro a un rango neutral significaría que el potencial debería de haber aumentado en cuatro unidades o más. El análisis estadístico mostró, con un nivel de confianza del 95%, que el aumento del potencial de hidrógeno del aguamiel no fue superior ni igual a las cuatro unidades. Si bien el tratamiento sí modifica el potencial de hidrógeno del aguamiel, el cambio no es lo suficientemente grande para cumplir con las necesidades de un tratamiento efectivo.

Estos resultados se obtuvieron luego de que las muestras de aguamiel pasaran 54.67 horas (tiempo de retención) dentro del reactor UASB. Este tiempo de retención resulta ser demasiado elevado para la velocidad a la cual trabajan los beneficios húmedos; también resulta ser elevado en comparación con los tiempos de retención que manejan generalmente los reactores tipo UASB. El tiempo de retención prolongado pudo haber afectado la magnitud de las variables evaluadas, inclusive provocando que el aguamiel tratada se acidificara aún más.

Para evaluar el funcionamiento del ABR se llevaron a cabo los mismos procedimientos y análisis estadísticos, pero en este caso se trabajó con 6 muestras de aguamiel. Los resultados de esta evaluación se muestran en la siguiente gráfica.

Figura 20. **Cambio del potencial de hidrógeno del aguamiel tratada en el ABR**



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la gráfica, el potencial de hidrógeno del aguamiel sí aumentó luego de pasar por el ABR. El valor de este parámetro aumentó en un promedio de 0.81 unidades, lo que implica que el tratamiento tuvo una eficiencia del 23%. Al analizar estadísticamente estos resultados, con un nivel de confianza del 95%, se determinó que el potencial de hidrógeno del aguamiel sí fue modificado por el tratamiento, pero la magnitud de este parámetro no se eleva hasta alcanzar una magnitud de 7 unidades o más. En el caso de este reactor, también es necesario tomar en cuenta que su tiempo de retención, 7.78 días, fue demasiado elevado en comparación con el tiempo de

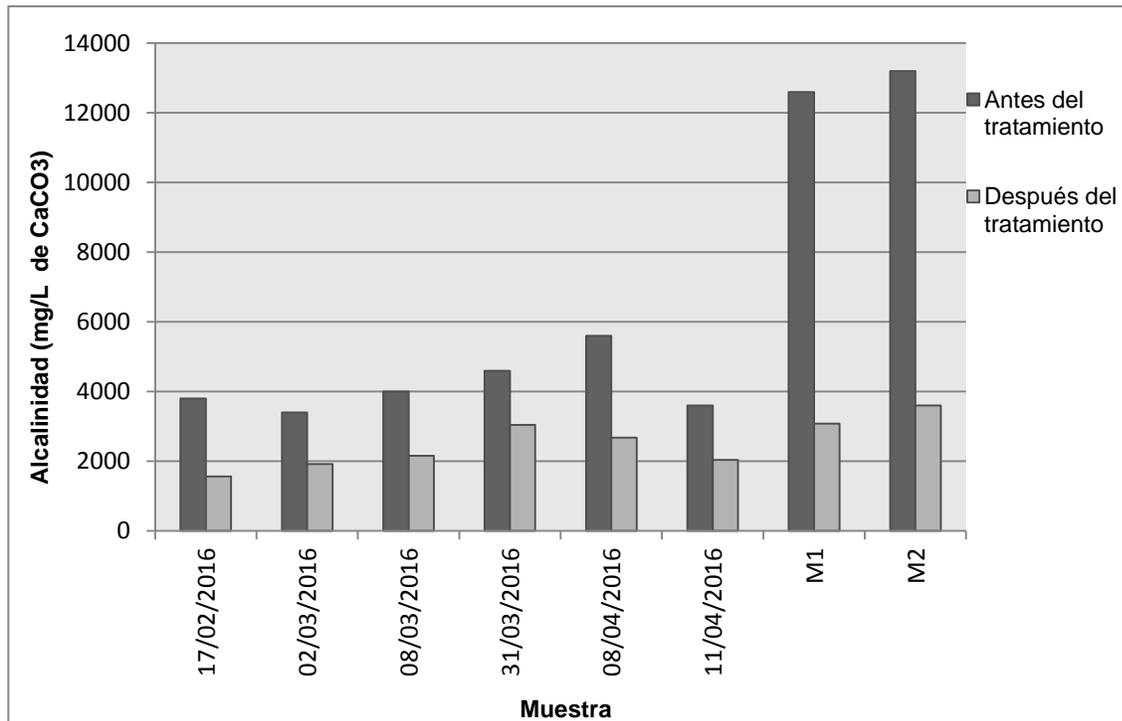
retención con el que trabajan los reactores tipo ABR cuando operan con agua residual doméstica.

4.2. Cambio de la alcalinidad

Según el trabajo de investigación de Yang et al., el tratamiento anaeróbico del aguamiel debería de destruir las proteínas contenidas en este tipo de agua residual y provocar la formación de amonio y bicarbonato, aumentando la alcalinidad del agua. Dado el vínculo entre estos dos parámetros es recomendable analizar, además de la alcalinidad, la concentración de nitrógeno amoniacal y orgánico en las muestras de agua que sean tratadas bajo este esquema. Sin embargo, en este estudio solamente se evaluaron los cambios en la magnitud de la alcalinidad del agua, reportada como la concentración de carbonatos de calcio.

Al determinar la alcalinidad de las muestras de aguamiel, antes de ser tratada con los reactores diseñados, se determinó que estas muestras solo contenían bicarbonatos. Como muestran los resultados, el tratamiento con ambos tipos de reactores disminuyó la concentración de la alcalinidad en el aguamiel tratada, lo cual contradice lo predicho por la tesis de Yang et al. Un análisis de nitrógeno amoniacal u orgánico podría haber sido de utilidad para determinar si las proteínas eran o no destruidas en los procesos de tratamiento implementados.

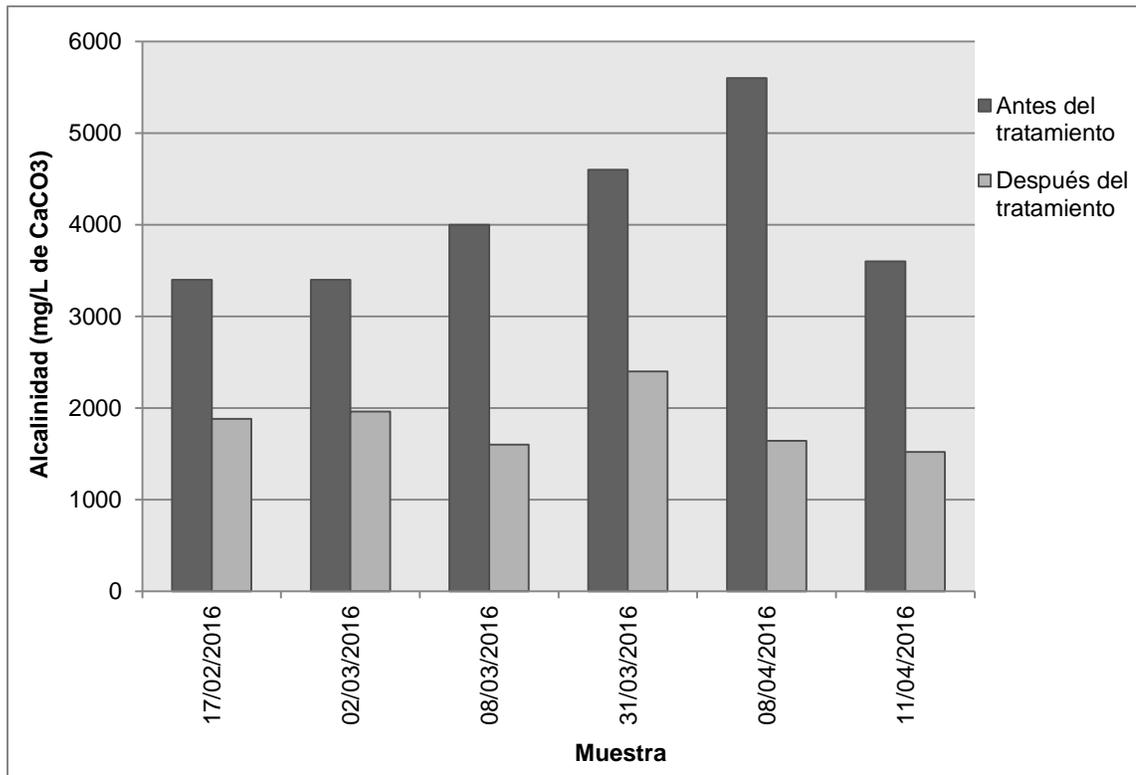
Figura 21. Cambio en la alcalinidad de las muestras tratadas con el UASB



Fuente: elaboración propia.

En promedio, con este tratamiento la alcalinidad de las muestras de aguamiel disminuyó en 4471 mg/L de CaCO₃, lo cual corresponde a una disminución de 55%. En el caso de las muestras tratadas con el ABR se obtuvo una disminución promedio de la alcalinidad de 2266 mg/L de CaCO₃, es decir, una disminución de 54% de este parámetro. En la siguiente gráfica se puede ver que en todas las muestras se provocó una disminución de este parámetro.

Figura 22. **Cambio en la alcalinidad de las muestras tratadas con el ABR**



Fuente: elaboración propia.

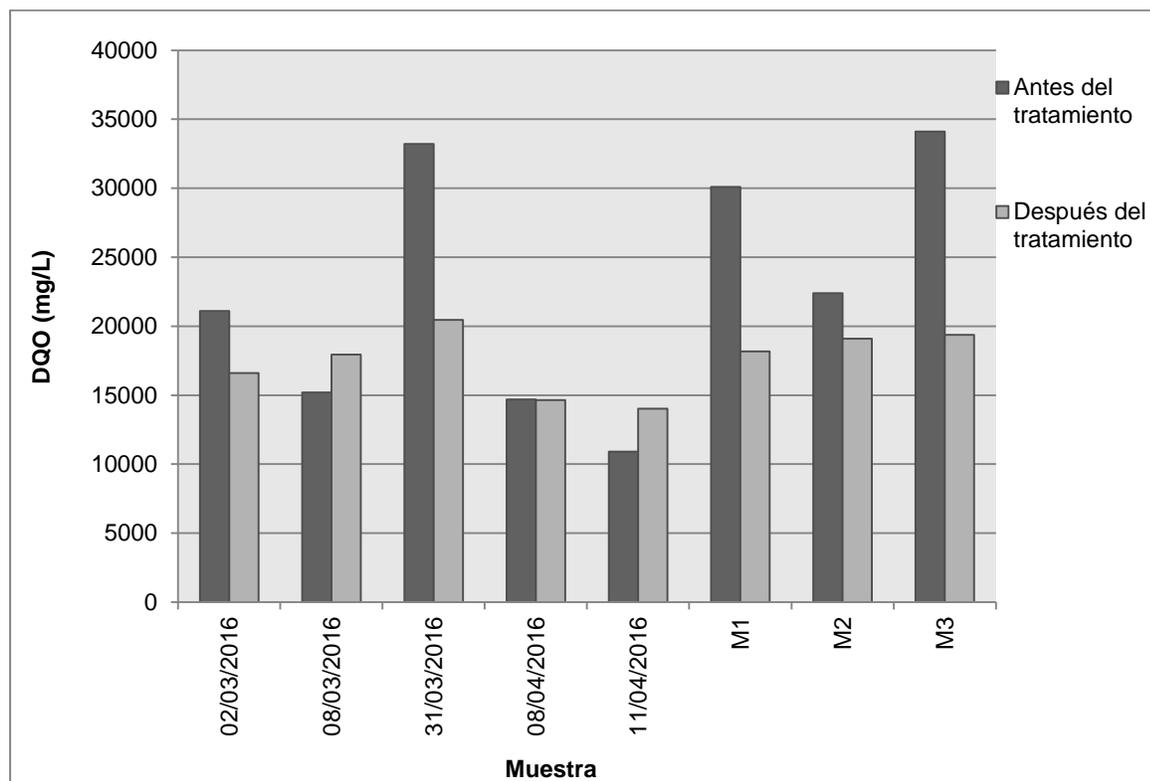
El análisis estadístico realizado, con un nivel de confianza del 95% mostró que ambos tratamientos, el UASB y el ABR, sí modificaron significativamente la magnitud de la alcalinidad de las muestras de agua, reduciendo su concentración.

4.3. Cambio de la demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno fue un parámetro utilizado para determinar que los reactores sí estaban funcionando, es decir, una disminución en el valor de este parámetro sirvió como indicador de la degradación química de la materia orgánica en el agua.

Al evaluar el cambio de DQO para el aguamiel tratada con el UASB, se tomaron 8 muestras.

Figura 23. Cambio en la DQO de las muestras tratadas con el UASB

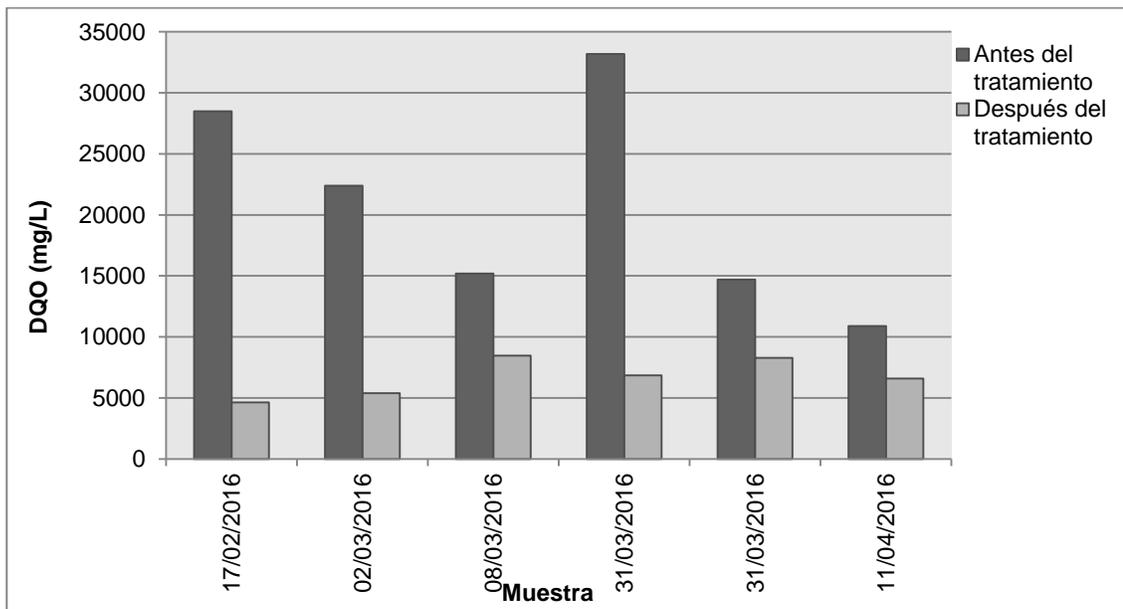


Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura anterior, la magnitud de la DQO disminuyó en cinco de estas muestras, en tanto que en una de las muestras la magnitud permaneció sin cambios y en las dos restantes la DQO aumentó. Esto último podría atribuirse a un arrastre de lodos en las muestras de agua tomadas a la salida del reactor. En promedio, el cambio en la magnitud de este parámetro fue de 5,443 mg/L y la eficiencia de este reactor para remover la materia orgánica, degradándola químicamente, fue de 27%. El análisis estadístico realizado, con un nivel de confianza del 95%, muestra que el tratamiento del aguamiel, utilizando el UASB sí modifica la magnitud de la DQO del aguamiel, disminuyendo ese parámetro.

El cambio de la DQO de las muestras tratadas con el ABR también fue evaluado. Los resultados de esto se muestran en la siguiente gráfica.

Figura 24. **Cambio en la DQO de las muestras tratadas con el ABR**



Fuente: elaboración propia.

Esta gráfica muestra que en los 6 casos evaluados la magnitud de la DQO disminuyó luego de pasar por el tratamiento. La eficiencia promedio de reducción de la DQO del ABR fue de 61% y el cambio promedio en la magnitud de la DQO fue de 14,116 mg/L. En este caso, el análisis de comparación de medias apareadas, realizado con un 95% de confianza, demuestra también que existe una diferencia significativa entre el valor de la DQO del aguamiel antes y después de ser tratada en el reactor tipo ABR, modificándola de la manera que disminuía.

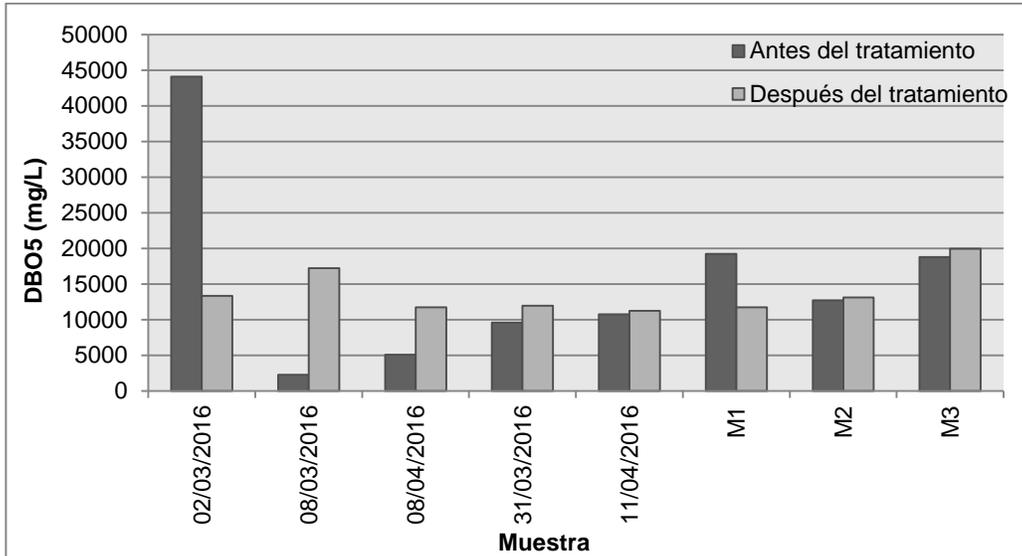
La diferencia en las eficiencias de remoción de DQO de ambos reactores se atribuye a la diferencia en los tiempos de retención con los que se trabajó; ya que el ABR tenía un tiempo de retención más alto, aseguraba un mayor contacto entre el aguamiel y los lodos que degradaban a la materia orgánica, mejorando la reacción de degradación.

4.4. Cambio de la demanda bioquímica de oxígeno

Además de analizar la DQO de las muestras de aguamiel, se analizó la demanda bioquímica de oxígeno antes y después de que el aguamiel fuera tratada con los reactores diseñados, evaluando así la degradación que los microorganismos hacían de la materia orgánica presente en esta agua residual.

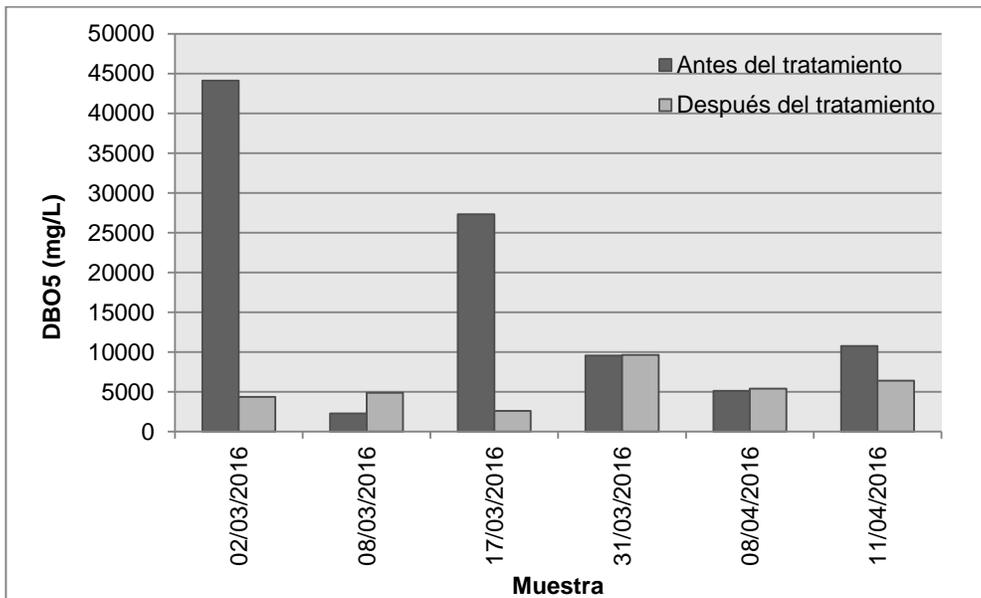
En la siguiente gráfica se muestra el resultado de la evaluación de la magnitud de la DBO_5 de las muestras de aguamiel, antes y después del tratamiento:

Figura 25. Cambio en la DBO₅ de las muestras tratadas con el UASB



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Cambio en la DBO₅ de las muestras tratadas con el ABR



Fuente: elaboración propia.

En el caso de las muestras tratadas con el UASB se puede observar que solo en dos de ellas se provocó una disminución en la magnitud de la DBO_5 , lo cual implica que los microorganismos presentes en los lodos del reactor sí degradaron la materia orgánica que contenía el aguamiel. Pero en el caso de las muestras restantes, el valor de la DBO_5 aumentó, lo cual quiere decir que en estos casos el reactor no fue capaz de degradar la materia orgánica de las muestras; o que debido al alto tiempo de retención de las muestras la carga contaminante se incrementó, ya que la velocidad del agua dentro reactor era baja y la materia orgánica que arrastraba, al permanecer prácticamente estancada, se degradó aún más.

Al evaluar la DBO_5 de las muestras que eran tratadas en el ABR se observó que en tres de ellas el valor de este parámetro disminuía, lo cual se podría atribuir al tipo de agitación que sufría el agua dentro del reactor, debido a los baffles instalados dentro de él, lo cual mejoraba el tipo de contacto entre el aguamiel y los lodos del reactor. Pero, en dos muestras el valor de la DBO_5 aumentó, posiblemente debido al alto tiempo de retención del dispositivo.

Sin embargo, el análisis estadístico realizado para comparar las medias del valor de la DBO_5 de las muestras tratadas en ambos reactores, realizado con un nivel de confianza del 95%, mostró que no existe una diferencia significativa entre la magnitud de la DBO_5 del agua a la entrada y a la salida de los tratamientos, es decir que ni el ABR ni el UASB fueron capaces de modificar la DBO_5 del aguamiel.

4.5. Generación de gas metano

Como subproducto de la degradación anaeróbica de la materia orgánica contenida en el agua residual, se debió de haber producido gas metano. Sin embargo, aunque experimentalmente se pudo apreciar que sí se producían

gases dentro del reactor, la cantidad producida era pequeña, lo que imposibilitaba medir este parámetro.

4.6. Tiempo de retención

Los tiempos de retención con los que trabajaron ambos reactores, en comparación con los tiempos de retención que convencionalmente se recomiendan para este tipo de dispositivos, fueron altos: lo cual podría haber provocado que la calidad del aguamiel se degradara aún más dentro de los reactores, provocando que la magnitud de parámetros como la DBO_5 aumentara y anulando el efecto que la degradación bioquímica podría haber provocado en la calidad del efluente.

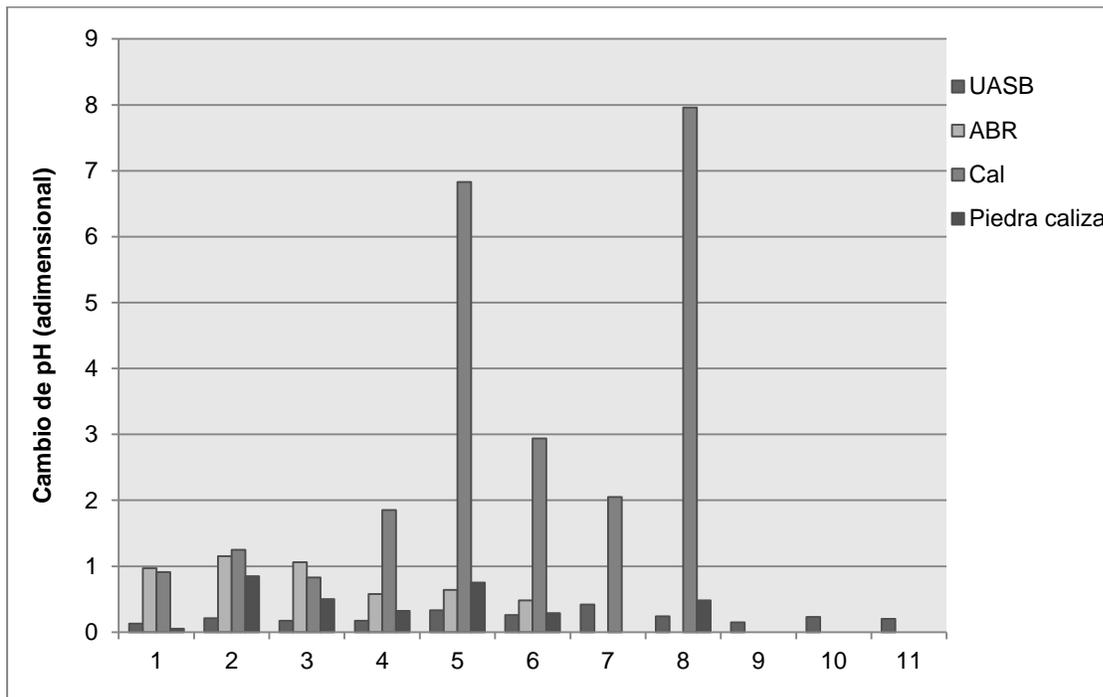
4.7. Comparación de métodos

La capacidad de los reactores para elevar el potencial de hidrógeno del agua fue comparada con la de otros dos métodos: agregar cal (óxido de calcio) al aguamiel y hacer circular el aguamiel por un lecho de piedra caliza.

El primer método mencionado, agregar óxido de calcio al aguamiel, es el utilizado tradicionalmente en los beneficios de café para tratar el agua residual del proceso, con el objetivo específico de aumentar su potencial de hidrógeno. La Asociación Nacional del Café de Guatemala recomienda a sus agremiados agregar de 2 a 3 kg de cal por cada metro cúbico de agua residual producido. Para replicar este tratamiento a nivel laboratorio se utilizó un vaso de precipitados, en donde se colocó una muestra de 400 mL de aguamiel y se le adicionó 1 gramo de cal. El potencial de hidrógeno y la alcalinidad de la muestra fueron medidos antes y después del tratamiento. El análisis se hizo con 8 muestras de aguamiel.

Como consecuencia de agregar óxido de calcio al aguamiel su potencial de hidrógeno aumentó, como se muestra en la siguiente figura, inclusive superando el pH neutro de 7 unidades.

Figura 27. **Comparación del cambio de potencial del hidrógeno con distintos tratamientos**



Fuente: elaboración propia.

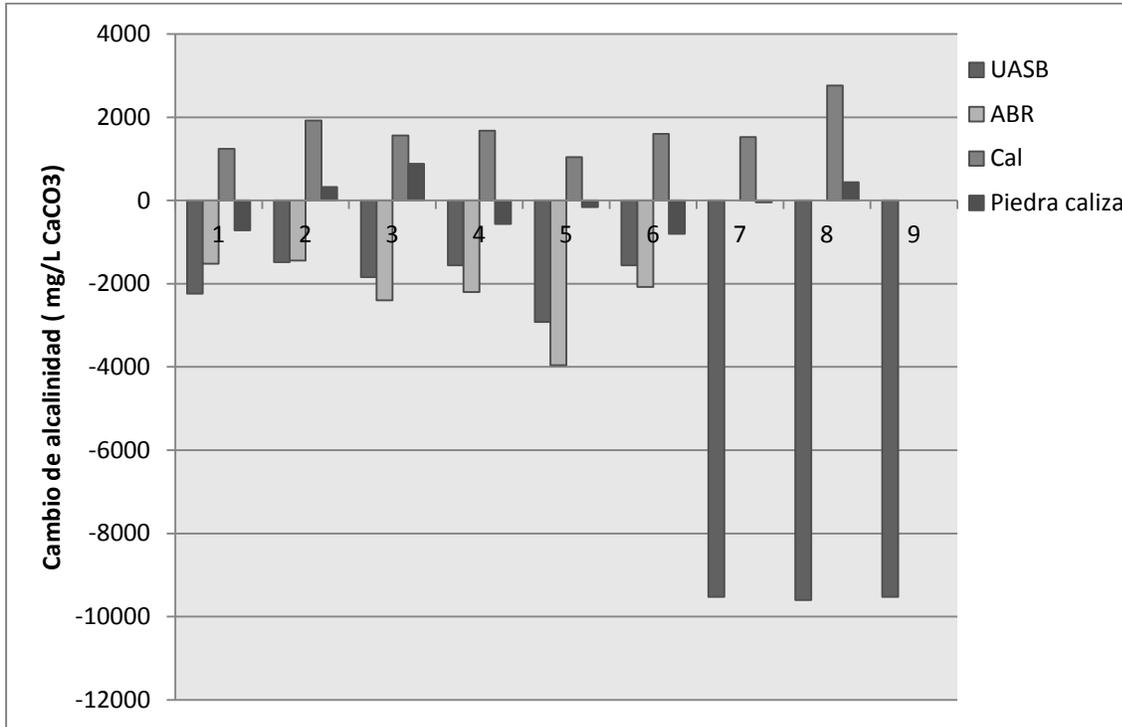
Al evaluar los cambios en la magnitud de la alcalinidad del aguamiel, antes y después del tratamiento, se puede apreciar que el valor de este parámetro aumenta. La alcalinidad de las muestras, antes de ser tratadas, se atribuye solamente a la presencia de bicarbonatos. Luego del tratamiento con cal, la magnitud de los bicarbonatos presentes en las tres primeras muestras, la muestra cinco y la muestra siete, aumenta. En las muestras número 4 y seis, correspondientes al mismo tratamiento, la alcalinidad se atribuye a la presencia

de bicarbonatos y carbonatos. La octava muestra presentó la presencia de carbonatos e hidróxidos, por lo cual el cambio del potencial de hidrógeno de esta muestra fue más drástico, llevando a la muestra a una condición que es considerada como alcalina.

La metodología de tratar el aguamiel con un lecho de piedra caliza fue propuesta por los estudiantes de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (USAC): Bianca Alas y Antonio Moreno. A nivel laboratorio, el tratamiento se replicó utilizando un tubo de PVC dentro del cual se colocó un volumen de roca caliza de 7.55 L. Se midió el potencial de hidrógeno y la alcalinidad del aguamiel antes de dejarla pasar por el lecho de roca caliza, y se volvieron a medir luego del tratamiento, esto se realizó con 8 muestras.

Como resultado de este tratamiento se observó un aumento en el potencial de hidrógeno de las muestras. Pero aunque se esperaba un aumento en la magnitud de la alcalinidad de las muestras, luego de pasar por el tratamiento, cinco de ellas mostraron un decremento en este parámetro. Debido a la composición química de la piedra caliza, en su mayoría compuesta por carbonato de calcio, se esperaba que el contacto del aguamiel con la roca aumentara la presencia de carbonatos en el agua; sin embargo, la alcalinidad de estas muestras, tanto a la entrada como a la salida del lecho de piedra caliza, se atribuye solamente a la presencia de bicarbonatos.

Figura 28. **Cambio de la concentración de alcalinidad**



Fuente: elaboración propia.

Un análisis ANOVA del cambio del potencial de hidrógeno provocado por los cuatro métodos investigados (ABR, UASB, cal y piedra caliza) permitió determinar, con un 95% de confianza, que por lo menos uno de estos tratamientos ofrece un resultado distinto a los otros tres. El análisis de Tukey realizado demostró, también con un nivel de confianza del 95%, que el tratamiento que provocó cambios más grandes en el potencial de hidrógeno de las muestras fue el tratamiento con cal.

CONCLUSIONES

1. Los reactores construidos a nivel laboratorio, tipo UASB y ABR, sí son capaces de aumentar la magnitud del potencial de hidrógeno del aguamiel, pero no son capaces de llevar el valor de este parámetro hasta un valor que pueda ser considerado neutro.
2. El reactor anaeróbico tipo UASB tuvo una eficiencia de 6% para aumentar el pH del aguamiel, en tanto que el reactor tipo ABR tuvo una eficiencia de 23% para aumentar la magnitud de este parámetro.
3. El reactor tipo UASB provocó una disminución promedio de la alcalinidad del aguamiel de 4471 mg/L de CaCO_3 , lo cual corresponde a una disminución del 55% de este parámetro. El aguamiel tratada en el ABR disminuyó su alcalinidad en un promedio de 2266 mg/L de CaCO_3 , es decir que el tratamiento redujo este parámetro en un 54%.
4. Los reactores construidos, el ABR y el UASB, generaron gas metano, pero el volumen generado no fue significativo y no pudo ser medido en el laboratorio.
5. El UASB disminuyó la magnitud de la DQO del agua tratada en un promedio de 5443 mg/L, lo cual corresponde a una eficiencia de 27%; en tanto que el DQO del agua tratada en el ABR cambió en un promedio de 14116 mg/L, es decir, que este tratamiento tuvo una eficiencia de 61%.

6. Los reactores utilizados en la investigación, el UASB y el ABR, no fueron capaces de modificar la DBO_5 de las muestras de aguamiel tratadas.
7. Experimentalmente, se determinó que el tratamiento que ofrecía mejores resultados, en cuanto a la elevación del potencial de hidrógeno del aguamiel, fue el agregar óxido de calcio al agua. El óxido de calcio modificó la magnitud del potencial de hidrógeno en un promedio de 3.08 unidades.

RECOMENDACIONES

1. Para evaluar la producción de carbonatos, como subproducto de la degradación de la materia orgánica en el aguamiel, es necesario determinar la magnitud de nitrógeno amoniacal y orgánico en el aguamiel, a la entrada y a la salida del reactor.
2. Llevar a cabo evaluaciones, a nivel laboratorio, para determinar la calidad de los lodos con los cuales se inoculan los reactores y evaluar la posibilidad de obtener gas metano como subproducto de su utilización.
3. Evaluar la estabilidad del potencial de hidrógeno, luego de llevar a cabo los cuatro tratamientos mencionados en este trabajo.
4. Evaluar la utilización de estos tipos de reactores utilizando tiempos de retención más pequeños, en comparación a los utilizados en esta tesis.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agramonte, O., (2008). *Tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando tecnología anaerobia UASB en clima templado – frío*. (Tesis de maestría). Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile.
2. Alias, B., & Moreno, M., (2013). *Evaluación de la eficiencia de modelos de experimentales de roca caliza y laguna facultativa, a escala laboratorio, para el ajuste del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado de café* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
3. Asociación Nacional del Café (2017). *Manual de Beneficiado Húmedo del Café, Guatemala*. Recuperado de https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Caficultura_BeneficiadoHumed
4. Bassuney, I. & Moustafa, (2013). *Performance of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) during start-up period*. *Revista Internacional de Ciencias Químicas, Ambientales y Biológicas*. Volumen 1, (ISSN 2320-4079; EISSN 2320-4087).
5. Blanco, D. *Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost* (Tesis de doctorado). Universidad de León, España.

6. Cerrato, C., (2013). *Neutralización del potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado de café* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
7. Foxon, Buckley, Brouckaert, Dama, Mtembu, Rodda, Smith, Pillay, Arjun, Lalbahadur y Bux, (2006). *The evaluation of the anaerobic baffled reactor for sanitation in dense peri-urban settlements*. Reporte de la comisión de investigación del agua. Universidad de KwaZulu-Natal, Durban e Instituto de Tecnología de Durban. WRC (ISBN No: 1-77005-371-9).
8. García, E., (2014). *Evaluación fisicoquímica de sub productos del beneficiado húmedo de café, sometidos a tratamiento anaeróbico; San Juan La Laguna, Sololá* (Tesis de licenciatura). Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
9. Jingxia, Y., Stewart, M. & Xiaoliang, D., (2014). *“Cog” anaerobic process for the treatment and valorization of coffee processing wastewater*. Ponencia presentada en la quinta conferencia de Ingeniería de desechos y valorización de la biomasa, Rio de Janeiro, Brasil.
10. Menchú, E., (1993). *Aplicación de la ingeniería química a la agroindustria del café* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
11. PROMECAFE, (1992). *Seminario – Taller El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: Una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector, Guatemala*.

Recuperado de <http://books.google.com.gt/books?id=--YNAQAAIAAJ&pg=PA26&dq=tratamiento+de+residuos+solidos+d+el+cafe&cd=2#v=onepage&q&f=false>

12. Romero, J. (Ed.). (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño*. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
13. Soto, R., & Vega, D. *Evaluación del uso de dos tipos de cal HORCALSA para el tratamiento de aguas residuales*. Anacafé, Guatemala.
14. XVI *Simposio de Caficultura Latinoamericana Volumen 2, (1993). Simposio dirigido por la Comisión Nacional del Café, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA., Nicaragua, Managua.*

APÉNDICES

Apéndice I. Monitoreo del pH del aguamiel tratada en el UASB

#	Fecha de entrada	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
1	16/02/2016	4.05	4.7	0.65	25% de aguamiel.
2	22/02/2016	4.19	4.67	0.48	25% de aguamiel.
3	24/02/2016	3.97	4.35	0.38	25% de aguamiel.
4	25/02/2016	3.94	4.27	0.33	25% de aguamiel.
5	01/03/2016	3.93	4.43	0.5	25% de aguamiel.
6	04/03/2016	4.01	4.27	0.26	25% de aguamiel.
7	07/03/2016	3.58	4.23	0.65	50% de aguamiel.
8	08/03/2016	3.58	4.25	0.67	50% de aguamiel.
9	09/03/2016	3.56	4.18	0.65	50% de aguamiel.
10	11/03/2016	3.46	3.97	0.51	75% de aguamiel.
11	15/03/2016	3.44	3.99	0.55	75% de aguamiel.
12	16/03/2016	3.55	3.84	0.29	75% de aguamiel.
13	04/04/2016	3.56	3.69	0.13	100% de aguamiel 25/1/2016 (agua de lavado).
14	05/04/2016	3.36	3.51	0.15	100% de aguamiel 25/1/2016 (agua de lavado).

Continuación apéndice I.

15	06/04/2016	3.43	3.48	0.05	100% de aguamiel 25/1/2016 (agua de lavado).
16	13/04/2016	3.29	3.5	0.21	100% de aguamiel 24/02/2016.
17	18/04/2016	3.33	3.65	0.32	100% de aguamiel 24/02/2016.
18	19/04/2016	3.36	3.73	0.37	100% de aguamiel 24/02/2016.
19	20/04/2016	3.43	3.76	0.33	100% de aguamiel 24/02/2016.
20	16/05/2016	3.7	3.87	0.17	100% de aguamiel 17/03/2016.
20	18/05/2016	3.47	3.64	0.17	100% de aguamiel (muestra filtrada) 02/03/2016.
21	23/05/2016	3.29	3.62	0.33	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/03/2016.
22	13/06/2016	3.67	3.93	0.26	100% de aguamiel (muestra filtrada) 31/03/2016.
23	15/06/2016	3.56	3.98	0.42	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/04/2016.
24	20/06/2016	3.59	3.83	0.24	100% de aguamiel (muestra filtrada) 11/04/2016.
25	21/06/2016	3.58	3.73	0.15	100% de aguamiel (muestra filtrada) M1 (11/2+2/3).
26	04/07/2016	3.53	3.76	0.23	100% de aguamiel (muestra filtrada) M2 (8/3+31/3).
27	04/07/2016	3.42	3.62	0.2	100% de aguamiel (muestra filtrada) M3 (31/3+2/3).

Fuente: elaboración propia.

Apéndice II. **Monitoreo de la DQO del aguamiel tratada con el UASB**

#	Fecha de entrada	DQO (mg/L) entrada	DQO (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DQO (mg/L)	Eficiencia (%)
1	08/02/2016	918.00	147.00	Agua residual doméstica.	771.00	83.99
2	01/03/2016	9170.00	7370.00	25% de aguamiel.	1800.00	19.62
3	07/03/2016	21100.00	9140.00	50% de aguamiel.	11960.00	56.68
4	11/03/2016	29900.00	15180.00	75% de aguamiel.	14720.00	49.23
5	05/04/2016	37000.00	21800.00	100% de aguamiel 25/01/2016.	15200.00	41.08
6	12/04/2016	35600.00	39400.00	100% de aguamiel 24/02/2016.	-3800.00	0.00
7	18/04/2016	27800.00	31000.00	100% de aguamiel 24/02/2016.	-3200.00	0.00
8	25/04/2016	28500.00	22000.00	100% de aguamiel 17/02/2016.	6500.00	22.81
9	18/05/2016	21100.00	16600.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 02/03/2016.	4500.00	21.32
10	13/06/2016	15200.00	17940.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/03/2016.	-2740.00	0.00
11	13/06/2016	33200.00	20460.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 31/03/2016.	12740.00	38.37
12	15/06/2016	14700.00	14640.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/04/2016.	60.00	0.41
13	20/06/2016	10900.00	14020.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 11/04/2016.	-3120.00	0.00
14	21/06/2016	30100.00	18180.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) (M1 17/2+2/3).	11920.00	39.60
15	04/07/2016	22400.00	19100.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) M2.	3300.00	14.73
16	04/07/2016	34100.00	19380.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) M3.	14720.00	43.17

Fuente: elaboración propia.

Apéndice III. Monitoreo de la alcalinidad de las muestras de aguamiel que ingresaron al UASB

#	Fecha de entrada	Volumen de H ₂ SO ₄ (ml)	Volumen de alícuota (ml)	Dilución	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Muestra	Tipo
1	02/05/2016	1.90	50.00	1/100	3800.00	17/02/2016	Bicarbonatos
2	17/05/2016	1.70	50.00	1/100	3400.00	02/03/2016	Bicarbonatos
3	23/05/2016	2.0	50.00	1/100	4000.00	08/03/2016	Bicarbonatos
4	15/06/2016	2.30	50.00	1/100	4600.00	31/03/2016	Bicarbonatos
5	13/06/2016	2.80	50.00	1/100	5600.00	08/04/2016	Bicarbonatos
6	20/06/2016	1.80	50.00	1/100	3600.00	11/04/2016	Bicarbonatos
7	21/06/2016	6.30	50.00	1/100	12600.00	M1	Bicarbonatos
8	04/07/2016	6.60	50.00	1/100	13200.00	M2	Bicarbonatos
9	04/07/2016	6.50	50.00	1/100	13000.00	M3	Bicarbonatos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice IV. Monitoreo de la alcalinidad de las muestras de aguamiel que salieron del UASB

#	Fecha de entrada	Volumen de ácido H ₂ SO ₄ (ml)	Volumen de alícuota (ml)	Dilución	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Muestra	Tipo
1	02/05/2016	3.90	50.00	5/100	1560.00	17/02/2016	Bicarbonatos
2	17/05/2016	4.80	50.00	5/100	1920.00	02/03/2016	Bicarbonatos
3	23/05/2016	5.40	50.00	5/100	2160.00	08/03/2016	Bicarbonatos
4	15/06/2016	7.60	50.00	5/100	3040.00	31/03/2016	Bicarbonatos
5	13/06/2016	6.70	50.00	5/100	2680.00	08/04/2016	Bicarbonatos
6	20/06/2016	5.10	50.00	5/100	2040.00	11/04/2016	Bicarbonatos
7	21/06/2016	7.70	50.00	5/100	3080.00	M1	Bicarbonatos
8	04/07/2016	9.00	50.00	5/100	3600.00	M2	Bicarbonatos
9	04/07/2016	8.70	50.00	5/100	3480.00	M3	Bicarbonatos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice V. **Cambio de la alcalinidad de las muestras tratadas en el UASB**

#	Fecha de entrada	Alcalinidad entrada(mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad salida (mg/L CaCO ₃)	Muestra	Cambio (mg/L)
1	02/05/2016	3800.00	1560.00	17/02/2016	-2240.00
2	17/05/2016	3400.00	1920.00	02/03/2016	-1480.00
3	23/05/2016	4000.00	2160.00	08/03/2016	-1840.00
4	15/06/2016	4600.00	3040.00	31/03/2016	-1560.00
5	13/06/2016	5600.00	2680.00	08/04/2016	-2920.00
6	20/06/2016	3600.00	2040.00	11/04/2016	-1560.00
7	21/06/2016	12600.00	3080.00	M1	-9520.00
8	04/07/2016	13200.00	3600.00	M2	-9600.00
9	04/07/2016	13000.00	3480.00	M3	-9520.00

Fuente: elaboración propia

Apéndice VI. **Monitoreo de la DBO₅ de las muestras que ingresaban al UASB**

#	OD inicial (mg/L)	OD final (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Volumen sembrado (ml)	Dilución	Condición del agua
1	7.20	4.30	29000.00	3.00	1/100	100% aguamiel (25/01/2016).
2	6.94	4.14	28000.00	3.00	1/100	100% aguamiel (24/02/2016).
3	6.99	2.58	44100.00	3.00	1/100	100% aguamiel (02/03/2016).
4	6.86	4.13	27300.00	3.00	1/100	100% aguamiel (17/03/2016).
5	4.39	3.71	2266.44	9.00	1/100	100% aguamiel (08/03/2016).

Continuación apéndice VI.

6	4.25	2.72	5099.49	9.00	1/100	100% aguamiel (08/04/2016).
7	4.14	1.27	9565.71	9.00	1/100	100% aguamiel (31/03/2016).
8	6.77	1.4	10740.00	15.00	1/100	100% aguamiel (11/04/2016).
9	7.14	1.37	19231.41	9.00	1/100	100% aguamiel M1.
10	7.24	3.42	12732.06	9.00	1/100	100% aguamiel M2.
11	7.24	1.60	18798.12	9.00	1/100	100% aguamiel M3.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice VII. **Monitoreo de la DBO₅ de las muestras que salían del UASB**

#	OD inicial (mg/L)	OD final (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Volumen sembrado (ml)	Dilución	Condición del agua
1	7.11	0.28	13660.00	15.00	1/100	100% aguamiel (25/01/2016).
2	7.03	0.48	13100.00	15.00	1/100	100% aguamiel (24/02/2016).
3	7.01	0.34	13340.00	15.00	1/100	100% aguamiel (02/03/2016).
4	6.86	0.37	12980.00	15.00	1/100	100% aguamiel (17/03/2016).
5	7.05	1.88	17231.61	9.00	1/100	100% aguamiel (08/03/2016).
6	7.12	1.25	11740.00	15.00	1/100	100% aguamiel (08/04/2016).
7	6.75	3.16	11965.47	9.00	1/100	100% aguamiel (31/03/2016).
8	7.15	1.53	11240.00	15.00	1/100	100% aguamiel (11/04/2016).
9	6.99	3.47	11732.16	9.00	1/100	100% aguamiel M1.
10	7.15	3.21	13132.02	9.00	1/100	100% aguamiel M2.
11	6.71	0.73	19931.34	9.00	1/100	100% aguamiel M3.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice VIII. **Comparación de la DBO₅ de las muestras ingresaban al UASB**

#	DBO ₅ entrada (mg/L)	DBO ₅ salida (mg/L)	Condición del agua	Cambio DBO ₅ (mg/L)	Eficiencia (%)
1	29000.00	13660.00	100% aguamiel (25/01/2016).	15340.00	52.90
2	28000.00	13100.00	100% aguamiel (24/02/2016).	14900.00	53.21
3	44100.00	13340.00	100% aguamiel (02/03/2016).	30760.00	69.75
4	27300.00	12980.00	100% aguamiel (17/03/2016).	14320.00	52.45
5	2266.44	17231.61	100% aguamiel (08/03/2016).	-14965.17	0.00
6	5099.49	11740.00	100% aguamiel (08/04/2016).	-6640.51	0.00
7	9565.71	11965.47	100% aguamiel (31/03/2016).	-2399.76	0.00
8	10740.00	11240.00	100% aguamiel (11/04/2016).	-500.00	0.00
9	19231.41	11732.16	100% aguamiel M1.	7499.25	38.99
10	12732.06	13132.02	100% aguamiel M2.	-399.96	0.00
11	18798.12	19931.34	100% aguamiel M3.	-1133.22	0.00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice IX. **Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para el potencial del hidrógeno de las muestras tratadas en el UASB**

No	Fecha de entrada	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
1	04/04/2016	3.56	3.69	0.13	100% de aguamiel 25/1/2016 (agua de lavado).
2	13/04/2016	3.29	3.5	0.21	100% de aguamiel 24/02/2016.
3	16/05/2016	3.70	3.87	0.17	100% de aguamiel 17/03/2016.
4	18/05/2016	3.47	3.64	0.17	100% de aguamiel (muestra filtrada) 02/03/2016.
5	23/05/2016	3.29	3.62	0.33	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/03/2016.
6	13/06/2016	3.67	3.93	0.26	100% de aguamiel (muestra filtrada) 31/03/2016.
7	15/06/2016	3.56	3.98	0.42	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/04/2016.
8	20/06/2016	3.59	3.83	0.24	100% de aguamiel (muestra filtrada) 11/04/2016.
9	21/06/2016	3.58	3.73	0.15	100% de aguamiel (muestra filtrada) M1 (11/2+2/3).
10	04/07/2016	3.53	3.76	0.23	100% de aguamiel (muestra filtrada) M2 (8/3+31/3).
11	04/07/2016	3.42	3.62	0.20	100% de aguamiel (muestra filtrada) M3 (31/3+2/3).

Continuación apéndice IX.

PROMEDIO (\bar{d})	0.2282
d_0	0
N	11
Desviación estándar (s_d)	0.0848
$t_{\text{calculada}}$	$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = 8.9211$
Nivel de confianza	95% (Una cola)
α	0.05
Grados de libertad	$\nu = n - 1 = 10$
t_{tabulada}	1.8125
P	2.2392E-6
$p < 0.0001$	
Conclusión	Se rechaza la hipótesis nula. Con un nivel de confianza del 95%, se puede decir que la diferencia entre el pH en la entrada y en la salida del tratamiento sí es significativo, lo cual implica que el tratamiento sí modifica de forma significativa la magnitud del potencial de hidrógeno de las muestras.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice X. Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para el potencial del hidrógeno de las muestras tratadas en el UASB, corroboración de potencial neutro

No.	Fecha de entrada	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
1	04/04/2016	3.56	3.69	0.13	100% de aguamiel 25/1/2016 (agua de lavado).
2	13/04/2016	3.29	3.5	0.21	100% de aguamiel 24/02/2016.
3	16/05/2016	3.70	3.87	0.17	100% de aguamiel 17/03/2016.
4	18/05/2016	3.47	3.64	0.17	100% de aguamiel (muestra filtrada) 02/03/2016.
5	23/05/2016	3.29	3.62	0.33	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/03/2016.
6	13/06/2016	3.67	3.93	0.26	100% de aguamiel (muestra filtrada) 31/03/2016.
7	15/06/2016	3.56	3.98	0.42	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/04/2016.
8	20/06/2016	3.59	3.83	0.24	100% de aguamiel (muestra filtrada) 11/04/2016.
9	21/06/2016	3.58	3.73	0.15	100% de aguamiel (muestra filtrada) M1 (11/2+2/3).
10	04/07/2016	3.53	3.76	0.23	100% de aguamiel (muestra filtrada) M2 (8/3+31/3).
11	04/07/2016	3.42	3.62	0.20	100% de aguamiel (muestra filtrada) M3 (31/3+2/3).

Continuación apéndice X.

PROMEDIO (\bar{d})	0.2282
d_0	4
N	11
Desviación estándar (s_d)	0.0848
$t_{\text{calculada}}$	$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = -147.4655$
Nivel de confianza	95% (Una cola)
α	0.05
Grados de libertad	$\nu = n - 1 = 10$
t_{tabulada}	-1.8125
P	2.5249E-18
$p < 0.0001$	
Conclusión	Se rechaza la hipótesis nula. Con un nivel de confianza del 95% se determina que el tratamiento no logra aumentar el potencial de hidrógeno en 4 unidades.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XI. **Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para la alcalinidad de las muestras tratadas en el UASB**

No.	Alcalinidad de entrada(mg/L)	Alcalinidad salida (mg/L)	Muestra	Cambio (mg/L)
1	3800.00	1560.00	17/02/2016	-2240.00
2	3400.00	1920.00	02/03/2016	-1480.00
3	4000.00	2160.00	08/03/2016	-1840.00
4	4600.00	3040.00	31/03/2016	-1560.00
5	5600.00	2680.00	08/04/2016	-2920.00
6	3600.00	2040.00	11/04/2016	-1560.00
7	12600.00	3080.00	M1	-9520.00
8	13200.00	3600.00	M2	-9600.00
9	13000.00	3480.00	M3	-9520.00
PROMEDIO (\bar{d})				-4471.11
d_0				0
N				9
Desviación estándar (s_d)				3832.27
$t_{calculada}$				$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = -3.50$
P				0.99
$p > 0.05$				
Nivel de confianza			95% (Una cola)	
α			0.05	
Grados de libertad			$\nu = n - 1 = 8$	
$t_{tabulada}$			-1.85	
Conclusión			Se acepta la hipótesis nula. Esto implica que, con un nivel de confianza del 95%, se puede asegurar que el tratamiento no aumentó la alcalinidad de las muestras. Por el contrario, el promedio de los datos muestra que la alcalinidad de las muestras disminuyó.	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XII. **Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para la DQO de las muestras tratadas en el UASB**

No.	DQO (mg/L) entrada	DQO (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DQO (mg/L)
1	37000.00	21800.00	100% de aguamiel 25/01/2016.	15200.00
2	27800.00	31000.00	100% de aguamiel 24/02/2016.	-3200.00
3	28500.00	22000.00	100% de aguamiel 17/02/2016.	6500.00
4	21100.00	16600.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 02/03/2016.	4500.00
5	15200.00	17940.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/03/2016.	-2740.00
6	33200.00	20460.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 31/03/2016.	12740.00
7	14700.00	14640.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 08/04/2016.	60.00
8	10900.00	14020.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) 11/04/2016.	-3120.00
9	30100.00	18180.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) (M1 17/2+2/3).	11920.00
10	22400.00	19100.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) M2	3300.00
11	34100.00	19380.00	100% de aguamiel (muestra filtrada) M3.	14720.00

Continuación apéndice XII.

PROMEDIO (\bar{d})	5443.64
d_0	0
N	11
Desviación estándar (s_d)	7259.64
$t_{\text{calculada}}$	$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = 2.49$
Nivel de confianza	95% (Una cola)
α	0.05
Grados de libertad	$\nu = n - 1 = 10$
t_{tabulada}	1.81
P	0.01
P<0.05	
Conclusión	Se rechaza la hipótesis nula. Esto implica que, con un nivel de confianza del 95%, se puede afirmar que el tratamiento sí modifica la magnitud de la DQO de la muestra.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XIII. **Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para la DBO₅ de las muestras tratadas en el UASB**

#	DBO ₅ entrada (mg/L)	DBO ₅ salida (mg/L)	Condición del agua	Cambio DBO ₅ (mg/L)
1	29000.00	13660.00	100% aguamiel (25/01/2016).	15340.00
2	28000.00	13100.00	100% aguamiel (24/02/2016).	14900.00
3	27300.00	12980.00	100% aguamiel (17/03/2016).	14320.00
4	44100.00	13340.00	100% aguamiel (02/03/2016).	30760.00
5	2266.44	17231.61	100% aguamiel (08/03/2016).	-14965.17
6	5099.49	11740.00	100% aguamiel (08/04/2016).	-6640.51
7	9565.71	11965.47	100% aguamiel (31/03/2016).	-2399.76
8	10740.00	11240.00	100% aguamiel (11/04/2016).	-500.00
9	19231.41	11732.16	100% aguamiel M1.	7499.25
10	12732.06	13132.02	100% aguamiel M2.	-399.96
11	18798.12	19931.34	100% aguamiel M3.	-1133.22
PROMEDIO (\bar{d})				5161.87

Continuación apéndice XIII.

d_0	0
N	11
Desviación estándar (s_d)	12834.39
$t_{\text{calculada}}$	$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = 1.33$
Nivel de confianza	95% (Una cola)
α	0.05
Grados de libertad	$r = n - 1 = 10$
t_{tabulada}	1.81
P	0.10
$p > 0.05$	
Conclusión	Se acepta la hipótesis nula, lo cual implica que, con un nivel de confianza del 95%, se puede asegurar que el tratamiento no modificó de forma significativa la magnitud de la DBO ₅ de las muestras.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XIV. **Monitoreo del potencial de hidrógeno de las muestras tratadas con el ABR**

No .	Fecha	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
1	31/03/2016	3.91	4.81	0.90	25% aguamiel de 25/01/2016.
2	11/04/2016	3.74	4.58	0.84	50% aguamiel de 24/02/2016.
3	27/04/2016	3.63	Problemas		75% de aguamiel.
4	02/05/2016	3.81			75% de aguamiel.
5	04/05/2016	3.82			75% de aguamiel.
6	16/05/2016	3.7	4.67	0.97	100% de aguamiel 17/02/2016.
7	17/05/2016	3.36	4.51	1.15	100% de aguamiel 02/03/2016.
8	18/05/2016	3.29	4.35	1.06	100% de aguamiel 08/03/2016.
9	19/05/2016	3.67	4.25	0.58	100% de aguamiel 31/03/2016.
10	20/05/2016	3.56	4.20	0.64	100% de aguamiel 08/04/2016.
11	25/05/2016	3.59	4.07	0.48	100% de aguamiel 11/04/2016.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XV. **Monitoreo de la DQO de las muestras tratadas con el ABR**

No .	Fecha de entrada	DQO (mg/L) entrada	DQO (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DQO (mg/L)	Eficiencia (%)
1	10/03/2016	490.00	61.00	Agua residual doméstica.	429.00	87.55
2	30/03/2016	10300.00	4100.00	25% de aguamiel.	6200.00	60.19
3	11/04/2016	19520.00	4300.00	50% de aguamiel.	15220.00	77.97

Continuación apéndice XV.

4	25/04/2016	59500.00	Problema	75% de aguamiel.	Problema	Problema
5	27/04/2016	8700.00		75% de aguamiel.		
6	02/05/2016	12200.00		75% de aguamiel.		
7	17/05/2016	28500.00	4620.00	100% de aguamiel (17/02/2016).	23880.00	83.79
8	17/05/2016	22400.00	5400.00	100% de aguamiel (02/03/2016).	17000.00	75.89
9	18/05/2016	15200.00	8460.00	100% de aguamiel (08/03/2016).	6740.00	44.34
10	19/05/2016	33200.00	6860.00	100% de aguamiel (31/03/2016).	26340.00	79.34
11	20/05/2016	14700.00	8280.00	100% de aguamiel (31/03/2016).	6420.00	43.67
12	26/05/2016	10900.00	6580.00	100% de aguamiel (11/04/2016).	4320.00	39.63

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XVI. **Monitoreo de la alcalinidad de las muestras que ingresaban al ABR**

No.	Fecha	Volumen de H ₂ SO ₄ (ml)	Volumen de alícuota (ml)	Dilución	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Tipo
1	04/05/2016	1.40	50.00	1/100	2800.00	Bicarbonatos
2	16/05/2016	1.70	50.00	1/100	3400.00	Bicarbonatos
3	17/05/2016	1.70	50.00	1/100	3400.00	Bicarbonatos
4	18/05/2016	2.00	50.00	1/100	4000.00	Bicarbonatos
5	19/05/2016	2.30	50.00	1/100	4600.00	Bicarbonatos
6	20/05/2016	2.80	50.00	1/100	5600.00	Bicarbonatos
7	25/05/2016	1.80	50.00	1/100	3600.00	Bicarbonatos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XVII. **Monitoreo de la alcalinidad de las muestras que salían del ABR**

No.	Fecha	Volumen de H ₂ SO ₄ salida (ml)	Volumen de alícuota (ml)	Dilución	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Muestra	Tipo
1	04/05/2016				Problema	75% de alcalinidad	Bicarbonatos
2	16/05/2016	4.70	50.00	5/100	1880.00	17/02/2016	Bicarbonatos
3	17/05/2016	4.90	50.00	5/100	1960.00	02/03/2016	Bicarbonatos
4	18/05/2016	4.00	50.00	5/100	1600.00	08/03/2016	Bicarbonatos
5	19/05/2016	6.00	50.00	5/100	2400.00	31/03/2016	Bicarbonatos
6	20/05/2016	4.10	50.00	5/100	1640.00	08/04/2016	Bicarbonatos
7	25/05/2016	3.80	50.00	5/100	1520.00	11/04/2016	Bicarbonatos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XVIII. **Monitoreo del cambio de alcalinidad en las muestras tratadas con el ABR**

No.	Fecha	Alcalinidad entrada (mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad salida (mg/L CaCO ₃)	Muestra	Cambio (mg/L)
1	04/05/2016	2800.00	Problema	75% de alcalinidad	Problema
2	16/05/2016	3400.00	1880.00	17/02/2016	-1520.00
3	17/05/2016	3400.00	1960.00	02/03/2016	-1440.00
4	18/05/2016	4000.00	1600.00	08/03/2016	-2400.00
5	19/05/2016	4600.00	2400.00	31/03/2016	-2200.00
6	20/05/2016	5600.00	1640.00	08/04/2016	-3960.00
7	25/05/2016	3600.00	1520.00	11/04/2016	-2080.00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XIX. **Monitoreo de la DBO₅ de las muestras que ingresaban al ABR**

No.	OD inicial (mg/L)	OD final (mg/L)	DBO ₅ (mg/L) entrada	Volumen sembrado (ml)	Dilución	Condición del agua
1	6.99	2.58	44100.00	3.00	1/100	100% aguamiel (02/03/2016).
2	4.39	3.71	2266.44	9.00	1/100	100% aguamiel (08/03/2016).
3	6.86	4.13	27300.00	3.00	1/100	100% aguamiel (17/03/2016).
4	4.14	1.27	9565.71	9.00	1/100	100% aguamiel (31/03/2016).
5	4.25	2.72	5099.49	9.00	1/100	100% aguamiel (08/04/2016).
6	6.77	1.40	10740.00	15.00	1/100	100% aguamiel (11/04/2016).

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XX. **Monitoreo de la DBO₅ de las muestras que salían del ABR**

No	OD inicial (mg/L)	OD final (mg/L)	DBO ₅ (mg/L) salida	Volumen sembrado (ml)	Dilución	Condición del agua
1	6.72	2.37	4350.00	3.00	0.10	100% aguamiel (02/03/2016).
2	6.77	4.33	4880.00	15.00	0.05	100% aguamiel (08/03/2016).
3	6.75	4.15	2600.00	3.00	0.10	100% aguamiel (17/03/2016).
4	6.75	1.93	9640.00	15.00	0.05	100% aguamiel (31/03/2016).
5	6.74	4.05	5380.00	15.00	0.05	100% aguamiel (08/04/2016).
6	6.85	0.45	6400.00	3.00	0.10	100% aguamiel (11/04/2016).

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXI. **Monitoreo del cambio de la DBO₅ de las muestras que ingresaban al ABR**

No.	DBO ₅ (mg/L) entrada	DBO ₅ (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DBO ₅ (mg/L)	Eficiencia (%)
1	44100.00	4350.00	100% aguamiel (02/03/2016).	39750.00	90.14
2	2266.44	4880.00	100% aguamiel (08/03/2016).	0.00	0.00
3	27300.00	2600.00	100% aguamiel (17/03/2016).	24700.00	90.47
4	9565.71	9640.00	100% aguamiel (31/03/2016).	0.00	0.00
5	5099.49	5380.00	100% aguamiel (08/04/2016).	0.00	0.00
6	10740.00	6400.00	100% aguamiel (11/04/2016).	4340.00	40.41

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXII. **Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para el potencial del hidrógeno de las muestras tratadas en el ABR**

No.	Fecha	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
1	16/05/2016	3.70	4.67	0.97	100% de aguamiel 17/02/2016
2	17/05/2016	3.36	4.51	1.15	100% de aguamiel 02/03/2016
3	18/05/2016	3.29	4.35	1.06	100% de aguamiel 08/03/2016
4	19/05/2016	3.67	4.25	0.58	100% de aguamiel 31/03/2016
5	20/05/2016	3.56	4.20	0.64	100% de aguamiel 08/04/2016
6	25/05/2016	3.59	4.07	0.48	100% de aguamiel 11/04/2016

Continuación apéndice XXII.

PROMEDIO (\bar{d})	0.81
d_0	0
N	6
Desviación estándar (s_d)	0.28
$t_{\text{calculada}}$	$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = 7.09$
Nivel de confianza	95% (Una cola)
α	0.05
Grados de libertad	$\nu = n - 1 = 5$
t_{tabulada}	2.01
P	4.30E-4
P<0.05	
Conclusión	Se rechaza la hipótesis nula. Con un nivel de confianza del 95%, se puede decir que el tratamiento sí modifica la magnitud del potencial de hidrógeno.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXIII. Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para el potencial del hidrógeno de las muestras tratadas en el ABR, comprobación potencial neutro

No.	Fecha	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
1	16/05/2016	3.70	4.67	0.97	100% de aguamiel 17/02/2016
2	17/05/2016	3.36	4.51	1.15	100% de aguamiel 02/03/2016
3	18/05/2016	3.29	4.35	1.06	100% de aguamiel 08/03/2016
4	19/05/2016	3.67	4.25	0.58	100% de aguamiel 31/03/2016
5	20/05/2016	3.56	4.20	0.64	100% de aguamiel 08/04/2016
6	25/05/2016	3.59	4.07	0.48	100% de aguamiel 11/04/2016

Continuación apéndice XXIII.

PROMEDIO (\bar{d})	0.81
d_0	4
N	6
Desviación estándar (s_d)	0.28
$t_{\text{calculada}}$	$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = -27.79$
Nivel de confianza	95% (Una cola)
α	0.05
Grados de libertad	$\nu = n - 1 = 5$
t_{tabulada}	-2.01
P	5.64E-7
$p < 0.0001$	
Conclusión	Se rechaza la hipótesis nula. Con un nivel de confianza del 95%, se infiere que el tratamiento no logra elevar el pH en cuatro unidades.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXIV. Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para la alcalinidad de las muestras tratadas en el ABR

#	Alcalinidad entrada (mg/L)	Alcalinidad salida (mg/L)	Muestra	Cambio (mg/L)
1	3400.00	1880.00	17/02/2016	-1520.00
2	3400.00	1960.00	02/03/2016	-1440.00
3	4000.00	1600.00	08/03/2016	-2400.00
4	4600.00	2400.00	31/03/2016	-2200.00
5	5600.00	1640.00	08/04/2016	-3960.00
6	3600.00	1520.00	11/04/2016	-2080.00

Continuación apéndice XXIV.

PROMEDIO (\bar{d})	-2266.67
d_0	0
N	6
Desviación estándar (s_d)	912.72
$t_{\text{calculada}}$	$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = -6.08$
Nivel de confianza	95% (Una cola)
α	0.05
Grados de libertad	$\nu = n - 1 = 5$
t_{tabulada}	-2.01
P	0.99
$p > 0.05$	
Conclusión	Se acepta la hipótesis nula, lo que implica que, con un nivel de confianza del 95%, se puede decir que el cambio de la alcalinidad de las muestras no fue mayor que cero. El promedio de los resultados muestra, que en realidad la alcalinidad disminuyó.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXV. **Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para la DQO de las muestras tratadas en el ABR**

#	DQO (mg/L) entrada	DQO (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DQO (mg/L)
1	28500.00	4620.00	100% de aguamiel (17/02/2016).	23880.00
2	22400.00	5400.00	100% de aguamiel (02/03/2016).	17000.00
3	15200.00	8460.00	100% de aguamiel (08/03/2016).	6740.00
4	33200.00	6860.00	100% de aguamiel (31/03/2016).	26340.00
5	14700.00	8280.00	100% de aguamiel (31/03/2016).	6420.00
6	10900.00	6580.00	100% de aguamiel (11/04/2016).	4320.00
PROMEDIO (\bar{d})				14116.67
d_0				0
N				6
Desviación estándar (s_d)				9619.51
$t_{\text{calculada}}$				$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = 3.59$
Nivel de confianza				95% (Una cola)
α				0.05
Grados de libertad				$\nu = n - 1 = 5$
t_{tabulada}				2.01
P				7.00E-3
$p < 0.05$				
Conclusión			Se rechaza la hipótesis nula, lo cual implica que el tratamiento sí provocó un cambio significativo en la magnitud de la DQO de la muestra, disminuyendo el valor de este parámetro. Esta afirmación se hace con un nivel de confianza del 95%.	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXVI. **Análisis estadístico, comparación de medias apareadas para la DBO₅ de las muestras tratadas en el ABR**

No.	DBO ₅ (mg/L) entrada	DBO ₅ (mg/L) salida	Condición del agua	Cambio DBO ₅ (mg/L)
1	44100.00	4350.00	100% aguamiel (02/03/2016).	39750.00
2	2266.44	4880.00	100% aguamiel (08/03/2016).	-2613.56
3	27300.00	2600.00	100% aguamiel (17/03/2016).	24700.00
4	9565.71	9640.00	100% aguamiel (31/03/2016).	-74.29
5	5099.49	5380.00	100% aguamiel (08/04/2016).	-280.51
6	10740.00	6400.00	100% aguamiel (11/04/2016).	4340.00
PROMEDIO (\bar{d})				10970.27
d_0				0
N				6
Desviación estándar (s_d)				17284.80
$t_{calculada}$				$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d/\sqrt{n}} = 1.55$
Nivel de confianza				95% (Una cola)
α				0.05
Grados de libertad				$\nu = n - 1 = 5$
$t_{tabulada}$				2.01
P				0.06
$p > 0.05$				
Conclusión			Se acepta la hipótesis nula. Esto implica que, con un nivel de confianza del 95%, se puede asegurar que el tratamiento no afecta significativamente la magnitud de la DBO ₅ .	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXVII. Cambio del potencial de hidrógeno provocado por el tratamiento del aguamiel con óxido de calcio

No.	Muestra	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio de pH (adimensional)
1	25/01/2016	3.52	4.43	0.91
2	17/02/2016	3.67	4.5	0.83
3	24/02/2016	3.72	5.57	1.85
4	08/03/2016	3.59	10.42	6.83
5	31/03/2016	3.58	4.83	1.25
6	08/04/2016	3.56	6.5	2.94
7	X	3.87	5.92	2.05
8	Y	3.71	11.67	7.96

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXVIII. Cambio de la alcalinidad provocado por el tratamiento del aguamiel con óxido de calcio

No	Muestra	Vol. H ₂ SO ₄ F (ml)	Vol. H ₂ SO ₄ N (ml)	Alc. entrada (mg/L CaCO ₃)	Tipo	Vol. H ₂ SO ₄ F (ml)	Vol. H ₂ SO ₄ N (ml)	Alc. salida (mg/L CaCO ₃)	Tipo	Cambio de alcalinidad (mg/L)
1	25/01/16	0.00	6.00	2400.00	Bicarbonatos	0.00	9.10	3640.00	Bicarbonatos	1240.00
2	17/02/16	0.00	6.60	2640.00	Bicarbonatos	0.00	10.50	4200.00	Bicarbonatos	1560.00
3	24/02/16	0.00	6.30	2520.00	Bicarbonatos	0.00	10.50	4200.00	Bicarbonatos	1680.00
4	08/03/16	0.00	6.30	2520.00	Bicarbonatos	2.40	6.50	3560.00	Bicarbonatos y carbonatos	1040.00
5	31/03/16	0.00	6.20	2480.00	Bicarbonatos	0.00	11.00	4400.00	Bicarbonatos	1920.00
6	08/04/16	0.00	5.80	2320.00	Bicarbonatos	1.80	8.00	3920.00	Bicarbonatos y carbonatos	1600.00
7	X	0.00	8.30	3320.00	Bicarbonatos	0.00	12.10	4840.00	Bicarbonatos	1520.00
8	Y	0.00	2.20	880.00	Bicarbonatos	5.20	3.90	3640.00	Carbonatos e hidróxido	2760.00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXIX. Cambio del potencial de hidrógeno provocado por el tratamiento del aguamiel con piedra caliza

No.	Muestra	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio de pH (adimensional)
1	17/02/2016	3.70	3.75	0.05
2	08/03/2016	3.65	4.50	0.85
3	31/03/2016	3.89	4.39	0.50
4	08/04/2016	3.88	4.20	0.32
5	19/10/2016	3.65	4.40	0.75
6	21/10/2016	3.47	3.76	0.29
7	X	4.13	4.11	0.00
8	Y	3.71	4.19	0.48

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXX. Cambio de la alcalinidad provocado por el tratamiento del aguamiel con óxido de calcio

No.	Muestra	Vol. H ₂ SO ₄ F (ml)	Vol. H ₂ SO ₄ N (ml)	Alc. entrada (mg/L CaCO ₃)	Tipo	Vol. H ₂ SO ₄ F (ml)	Vol. H ₂ SO ₄ N (ml)	Alc. salida (mg/L CaCO ₃)	Tipo	Cambio de alcalinidad (mg/L)
1	17/02/2016	0.00	7.60	3040.00	Bicarbonatos	0.00	5.80	2320.00	Bicarbonatos	0.00
2	08/03/2016	0.00	6.70	2680.00	Bicarbonatos	0.00	7.50	3000.00	Bicarbonatos	320.00
3	31/03/2016	0.00	5.30	2120.00	Bicarbonatos	0.00	7.50	3000.00	Bicarbonatos	880.00
4	08/04/2016	0.00	7.60	3040.00	Bicarbonatos	0.00	6.20	2480.00	Bicarbonatos	0.00
5	19/10/2016	0.00	3.40	1360.00	Bicarbonatos	0.00	3.00	1200.00	Bicarbonatos	0.00
6	21/10/2016	0.00	3.70	1480.00	Bicarbonatos	0.00	1.70	680.00	Bicarbonatos	0.00
7	X	0.00	7.10	2840.00	Bicarbonatos	0.00	7.00	2800.00	Bicarbonatos	0.00
8	Y	0.00	2.20	880.00	Bicarbonatos	0.00	3.30	1320.00	Bicarbonatos	440.00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXI. **Comparación de cambio del potencial de hidrógeno de muestras de aguamiel sometidas a cuatro tratamientos distintos**

		TRATAMIENTOS			
		UASB	ABR	Cal	Piedra caliza
MUESTRAS	Cambio de pH				
	0.13	0.97	0.91	0.05	
	0.21	1.15	1.25	0.85	
	0.17	1.06	0.83	0.5	
	0.17	0.58	1.85	0.32	
	0.33	0.64	6.83	0.75	
	0.26	0.48	2.94	0.29	
	0.42		2.05	0,00	
	0.24		7.96	0.48	
	0.15				
	0.23				
	0.20				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXII. **Análisis estadístico ANOVA para el cambio del potencial de hidrógeno provocado por cuatro tratamientos distintos**

$F_{\text{Calculada}}$	7.77
F_{Tabulada}	2.93
Nivel de confianza	95%
Conclusión	Se acepta la hipótesis alterna. Con un nivel de confianza del 95%, se infiere que por lo menos uno de los tratamientos ofrece resultados distintos.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXIII. **Comparación de cambio de la alcalinidad de muestras de aguamiel sometidas a cuatro tratamientos distintos**

	TRATAMIENTOS			
	UASB	ABR	Cal	Piedra caliza
	Cambio de alcalinidad (CaCO ₃)			
MUESTRAS	-2240.00	-1520.00	1240.00	-720.00
	-1480.00	-1440.00	1920.00	320.00
	-1840.00	-2400.00	1560.00	880.00
	-1560.00	-2200.00	1680.00	-560.00
	-2920.00	-3960.00	1040.00	-160.00
	-1560.00	-2080.00	1600.00	-800.00
	-9520.00		1520.00	-40.00
	-9600.00		2760.00	440.00
	-9520.00			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXIV **Análisis estadístico ANOVA para el cambio de la alcalinidad provocado por cuatro tratamientos distintos**

F _{Calculada}	12.73
F _{Tabulada}	2.96
Nivel de confianza	95%
Conclusión	Se acepta la hipótesis alterna. Con un nivel de confianza del 95%, se infiere que por lo menos uno de los tratamientos ofrece resultados distintos.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXV. **Comparación del promedio del cambio de pH entre tratamientos**

Tratamiento	Diferencia promedio de pH (adimensional)
Cal	3.07
ABR	0.81
Piedra caliza	0.40
UASB	0.23

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXVI. **Parámetros para la prueba de Tukey**

Tratamientos	4
Grados de libertad del error	29
Promedio de los cuadrados del error	1.88
Nivel de confianza	95%
Significancia	0.05
Comparador (q Tukey)	3.86

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXVII. **Comparación de tratamientos**

Tratamiento 1	Tratamiento 2	Muestras 1	Muestras 2	Diferencia	W	Conclusión
UASB	ABR	11	6	0.58	1.90	Son iguales.
UASB	Cal	11	8	2.85	1.74	No son iguales.
UASB	Piedra caliza	11	8	0.17	1.74	Son iguales.
ABR	Cal	6	8	2.26	2.02	No son iguales.
ABR	Piedra caliza	6	8	0.41	2.02	Son iguales.
Cal	Piedra caliza	8	8	2.67	1.87	No son iguales.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXVIII. **Matriz comparativa de Tukey**

Tratamiento	Diferencia promedio de pH (adimensional)					Límite inferior	Límite superior
Cal (mayor cambio de pH).	3.0775	A				2.08	4.07
ABR.	0.8133		b			-0.33	1.96
Piedra caliza.	0.4050		b	C		-0.59	1.40
UASB (menor cambio de pH).	0.2282		b	C	d	-0.62	1.07

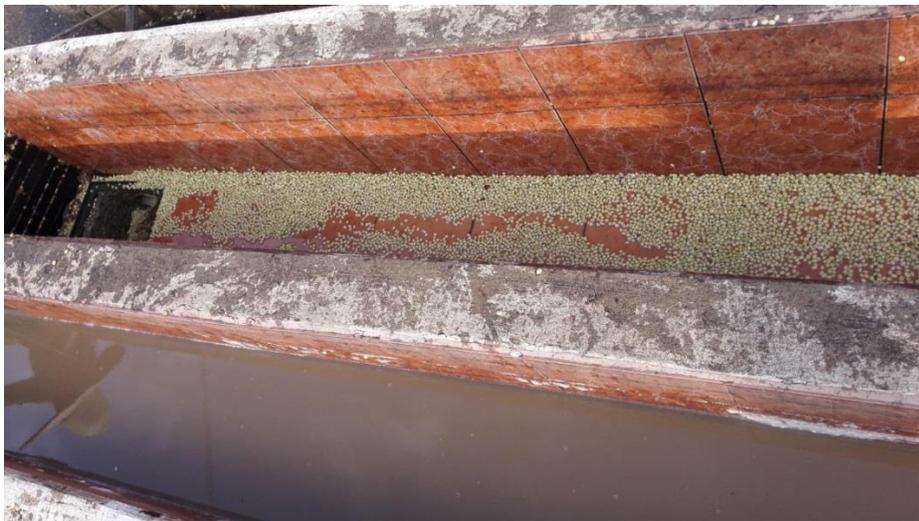
Fuente: elaboración propia.

Apéndice XXXIX. **Fotografía del beneficio húmedo de café Nuevo Sendero**



Fuente: beneficio húmedo de café Nuevo Sendero, Santa Rosa.

Apéndice XL. **Canales de lavado y clasificación del café**



Fuente: beneficio húmedo de café Nuevo Sendero, Santa Rosa.

Apéndice XLI.

Café despulpado



Fuente: beneficio húmedo de café Nuevo Sendero, Santa Rosa.

Apéndice XLII.

Secado del café pergamino



Fuente: beneficio húmedo de café Nuevo Sendero, Santa Rosa.

Apéndice XLIII.

Agua residual del despulpado



Fuente: beneficio húmedo de café Nuevo Sendero, Santa Rosa.

Apéndice XLIV. **Subproducto sólido del proceso**



Fuente: beneficio húmedo de café Nuevo Sendero, Santa Rosa.

Apéndice XLV. **Toma de muestras de aguamiel**



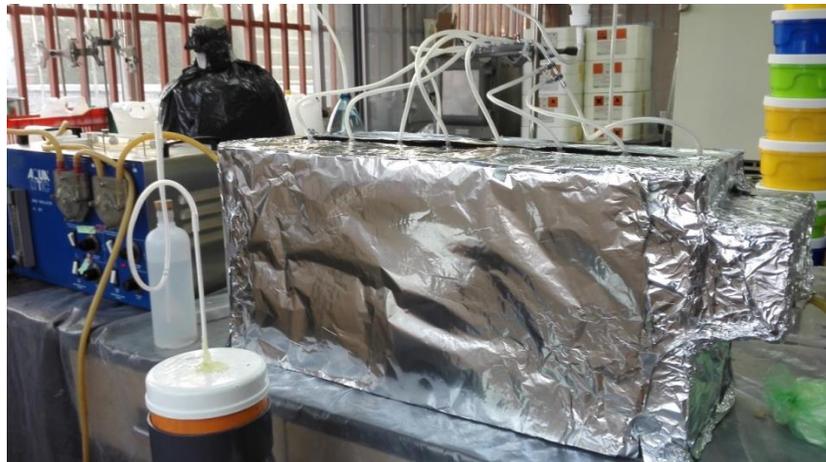
Fuente: beneficio húmedo de café Nuevo Sendero, Santa Rosa.

Apéndice XLVI. **Ingreso de lodos al reactor ABR**



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Apéndice XLVII. **Reactor ABR**



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.

Apéndice XLVIII. **Actividad microbiana dentro del ABR**



Fuente: laboratorio Dra. Alba Tabarini, edificio T-5, Facultad de Ingeniería.